

ВИКОРИСТАННЯ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ КАПІЛЯРНИХ СИСТЕМ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СУЦІЛЬНОСТІ ПАЛИВА КОСМІЧНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

Сергій Давидов

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4142-7217>

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Дніпро

Олег Колесніченко

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6115-1481>

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Дніпро

Анастасія Давидова

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-1064-1628>

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Дніпро

Розвиток ракетно-космічної галузі пов'язаний зі створенням нових космічних апаратів (КА) багатоцільового призначення. Основною умовою їх тривалого функціонування у космічному просторі є можливість багатократного включення маршових двигунів протягом декількох років.

Паливна система КА повинна забезпечувати потрапляння палива з баків у камеру згоряння двигунів в заданий момент часу без газових включень і в необхідній кількості в умовах практичної невагомості. Протягом інерційного руху КА компоненти палива перемішуються з газом наддуву в порожнині бака. Для гарантованої відсутності газових пазирів в потоці палива, що рухається по магістралі, яка з'єднує бак з ракетним двигуном, необхідне використовувати спеціальні системи забезпечення суцільності палива (СЗСП).

На теперішній час розроблені і успішно використовуються різноманітні СЗСП [1]. Найбільшу універсальність, і, як наслідок, дуже широке розповсюдження в конструкціях сучасних КА мають СЗСП капілярного типу. Функціонування цих систем ґрунтується на використанні сил міжмолекулярної взаємодії, які в умовах невагомості є домінуючими [2]. Слід зазначити, що існує велика кількість різноманітних конструкцій капілярних СЗСП в залежності від призначення КА.

Окремо слід виділити СЗСП сітчастого типу, основним робочим елементом яких є тканина металева сітка з чарунками мікронних розмірів [3]. Сітчасті СЗСП мають цілу низку переваг у порівнянні з іншими СЗСП. Перш за все, сітчасті СЗСП ефективно працюють з будь-якими компонентами ракетних палив, включаючи криогенні. Термін

їх роботи вимірюється десятками років, а кількість повторних включень двигунів КА практично не обмежена. Сітчасті СЗСП можна пристосовувати для паливних баків будь-якої форми і габаритів.

Але ці системи мають і ряд суттєвих недоліків, які обмежують можливості їх використання. Основним проектним параметром, який характеризує працездатність сітчастої СЗСП, є статична утримуюча здібність (СУЗ) її сітчастих елементів (СЕ) [1]. Це максимальне значення капілярного перепаду тиску $\Delta p_{\text{кар}}$, який може бути досягнутий на СЕ. У випадку перевищення діючого перепаду тиску $\Delta p_{\text{кар}}$ виникає прорив газової фази в магістраль подачі палива і, відповідно, зрив запуску двигунів КА. Значення $\Delta p_{\text{кар}}$ розраховується за формулою Лапласа [4]:

$$\Delta p_{\text{кар}} = \frac{2\sigma \cos \theta}{r_c}$$

де σ - коефіцієнт поверхневого натягу, кг/с^2 ;

θ - контактний кут змочування матеріалу СЕ паливом, градус;

r_c - ефективний радіус кривизни поверхні розділу «рідина-газ» в чарунках СЕ, м.

Як безпосередньо випливає з формули Лапласа, рівень працездатності сітчастої СЗСП залежить від розміру чарунок СЕ. Для покращення проектних параметрів СЗСП необхідно зменшувати розміри чарунок СЕ, що, в свою чергу викликає зростання її СУЗ. Але технологія виготовлення СЕ, які є тканими металевими сітками, не дозволяє зменшити розмір чарунок нижче 30 мікрон для сіток полотняного типу плетіння і нижче 6-7 мікрон для сіток фільтрового типу плетіння [1]. Крім того, сітки фільтрового типу плетіння мають дуже великий коефіцієнт гідравлічного опору і підвищену схильність до забруднення [3].

Технологія виготовлення СЕ ткацьким методом не дозволяє досягнути однакового розміру чарунок. Їх розміри розподіляються в межах певного проміжку, який визначається за відповідними стандартами на їх виготовлення. У свою чергу, рівень СУЗ сітчастої СЗСП $\Delta p_{\text{кар}}$ визначається максимальним розміром чарунок СЕ. Негативно впливає на технічні характеристики сітчастої СЗСП дуже незначна жорсткість СЕ. Цей фактор вимагає використовувати спеціальні підсилюючі засоби для підвищення жорсткості СЕ [5], що суттєво ускладнює конструкцію СЗСП.

Слід відзначити, що утримуюча здібність сітчастих СЗСП дуже залежить від температури компонентів палива, оскільки від температури залежить значення коефіцієнта поверхневого натягу палива σ в формулі Лапласа. Це впливає на рівень працездатності СЗСП,

особливо якщо паливо є криогенна рідина. Використання сітчастих СЗСП в баках з криогенними компонентами викликає часткове висихання СЕ при зростанні температури в баку вище критичного значення. Така ситуація є аварійною, оскільки сітчаста СЗСП припиняє своє функціонування в якості розділювача фаз [6].

Технологія виробництва ракетно-космічної техніки постійно удосконалюється. Виникають нові можливості по підвищенню технічних характеристик її окремих конструктивних елементів. Розглянемо як саме можуть впливати нові технології на характеристики СЕ капілярних СЗСП.

Протягом останніх декількох років для виготовлення окремих конструктивних елементів ракетно-космічних виробів широко використовуються адитивні технології. Створення СЕ за допомогою цих технологій дозволяє усунути ряд негативних властивостей, які притаманні тканим сіткам. Перш за все, за допомогою 3-D печаті можна забезпечити створення СЕ з однаковим розміром чарунок і априорно заданою геометрією каналу. Забезпечується будь-яка довжина каналу чарунок і, відповідно, жорсткість СЕ. Мінімально можливий розмір чарунок такого СЕ залежить від технічного рівня досконалості 3-D принтера. Це реальні переваги, які має перехід на новий технологічний процес створення сітчастих СЗСП. Яким чином в цьому випадку змінюються гідравлічний опір СЕ, а також функціонування сітчастої СЗСП в баках з криогенними компонентами потребує окремих досліджень.

Фактично при переході на адитивні технології замість тканих сіток в якості СЕ використовують перфоровані металеві пластини. Такі альтернативні розділювачі фаз існують в якості елементів конструкції СЗСП достатньо давно [7]. Але мінімальний розмір чарунок таких СЗСП був дуже великий, оскільки перфорація робочих пластин виконувалась механічним методом і створення СЕ с розміром чарунок в декілька мікрон практично неможлива. Використання при створенні чарунок лазерної техніки дозволяє суттєво зменшити розміри чарунок, але загальна кількість таких чарунок на СЕ дуже великою. Це, в свою чергу, робить вартість такої СЗСП неприпустимо великою. Необхідно відзначити, що вартість виготовлення перфорованих пластин за лазерною технологією безпосередньо залежить від швидкості створення отворів в пластині. Тому, за умови суттєвого прискорення цього технологічного процесу цій шлях створення сітчастих СЗСП має гарні перспективи.

Таким чином, використання нових технологій при створенні капілярних СЗСП сітчастого типу дозволяє суттєво покращити їх технічні параметри. Але, для проведення кількісної оцінки зміни технічних

параметрів СЗСП при переході на нові технології необхідно провести відповідні експериментальні дослідження.

ПОСИЛАННЯ

1. Чуприна, А. А., Давидов, С. О., & Кривенко, А. А. (2024, February). Установка для експериментального дослідження взаємодії газових пузирів з сітчастим роздільником в потоці рідини. *In The 7th International scientific and practical conference "Professional development: theoretical basis and innovative technologies"* (February 20-23, 2024) Paris, France. International Science Group. 2024. 427 p. (p. 411).

2. Давыдов, С. А., & Горелова, К. В. (2012). История совершенствования конструкций и перспективы использования средств обеспечения сплошности топлива на основе капиллярных сил.

3. Polyakov, M. V., Davudov, S. A., Davudova, A. V., & Heti, K. V. (2018). Design parameters of mesh phase delimiters for ensuring repeated starting of spacecraft in the conditions of heightless.

4. Оно С, К. С. (1963). Молекулярная теория поверхностного натяжения в жидкостях.

5. Давыдов, С. (2006). Изменение работоспособности сетчатых средств обеспечения сплошности топлива при увеличении коэффициента упругости. *Вісник Дніпропетровського університету. Ракетно-космічна техніка*, (10), Стаття 9.

6. Давидов, С. ., Журавель, П. ., Кривенко, А. ., & Левченко, В. . (2022). Вплив температури на працездатність паливної системи космічних літальних апаратів. *Системне проектування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки*, 30(1), 3-13. <https://doi.org/10.15421/472201>

7. Tegart, J., & Wright, N. (1983). Double perforated plate as a capillary barrier. *In 19th Joint Propulsion Conference* (p. 1379).