

*О.М. Мінай, І.Ю. Кузьміч  
(ДП «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля», Дніпро, Україна)*

## **Застосування методів CFD моделювання при оптимізації конструкції забірних пристроїв у паливних баках ракет-носіїв**

*Авторами, замість повсюдного використання емпіричних залежностей при виконанні робіт з оптимізації конструкції бічного забірного пристрою в баку пального с тунельним трубопроводом, було застосовано метод CFD моделювання, за результатами якого було обрано оптимальний варіант конструкції за показником підвищення енергетичних характеристик ракети-носія.*

### **Бічні забірні пристрої.**

Наявність у баках пального деяких ракет-носіїв (РН) тунельного трубопроводу, малій відстані між входом у рушійну установку (РУ) і дном баку, потреби роздільного живлення кількох двигунів із одного баку для забезпечення живлення РУ компонентами палива (КП), значно ускладнює можливість забору палива із полюса баку.

Одним із досить розповсюджених варіантів рішення щодо забору палива із баку в цьому випадку є використання бічного ЗП.

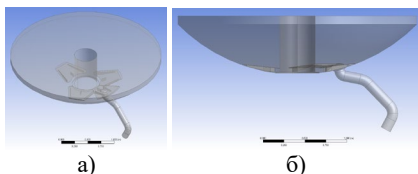
Бічні ЗП характеризуються кутом розташування відносно полюса баку  $\beta$  (для центральних забірних пристроїв кут  $\beta = 0$ ). Наявність кута  $\beta$  призводить до нерівномірного за рівнем прориву газу до входу у витратну магістраль (ВМ) і, як наслідок, значному збільшенню гідравлічних залишків компонентів палива (ЗКП), що негативно позначається на енергетичних характеристиках РН.

У статті [1], на прикладі баку пального першого ступеня РН «Циклон-4», який обладнано бічними ЗП у вигляді профільованої пластини (тарілі), для усунення недоліків, притаманних бічному ЗП, авторами було розглянуто використання замість тарілі – сифонного та кільцевого ЗП. За для чого були здійснені проектні роботи по визначенню їх основних геометричних параметрів (розробка конструктивних схем), та проведено розрахунок значення статичного гідравлічного ЗКП, за методикою [2], яка ґрунтується на емпіричних та напівемпіричних залежностях, коефіцієнти до яких було отримано за результатами експериментального відпрацювання масштабних моделей, конструкція яких найбільш подібна до обраних ЗП.

У розвиток проектних робіт наведених у статті [1], з метою більш досконалого розрахунку робочих параметрів ЗП (визначення статичного гідравлічного ЗКП), авторами було проведено:

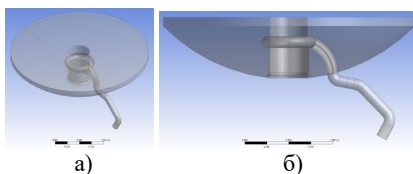
- фізичний експеримент по визначенню ЗКП для бічного ЗП, на дослідних конструкціях;
- CFD моделювання гідродинамічних процесів під час випорожнення баку і визначення ЗКП для бічного, сифонного та кільцевого ЗП за допомогою ANSYS Fluent;
- верифікацію CFD моделювання за результатами фізичного експерименту;

– порівняльний аналіз і підтвердження оптимальної конструкції ЗП за фактором впливу отриманих значень ЗКП на зміни енергетичних характеристик РН по результатам CFD моделювання.



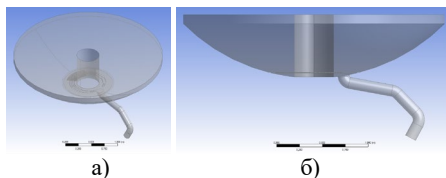
а) аксонометричний вигляд; б) вигляд по переду

Рис. 1. Принципова конструктивна схема бічного ЗП



а) аксонометричний вигляд; б) вигляд по переду

Рис. 2. Принципова конструктивна схема сифонного ЗП



а) аксонометричний вигляд; б) вигляд по переду

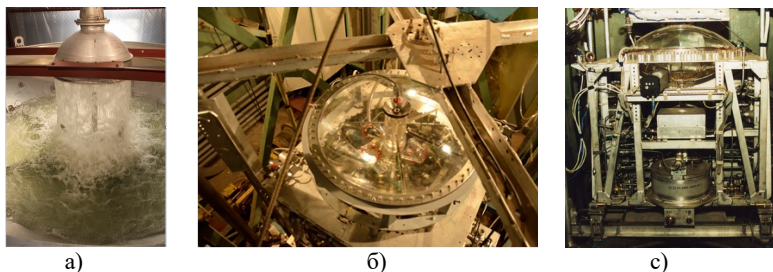
Рис. 3. Принципова конструктивна схема кільцевого ЗП

#### **Фізичний експеримент.**

Фізичний експеримент по визначенню статичних гідравлічних ЗКП для бічного ЗП було проведено на дослідних конструкціях (ДК) масштабів  $M_1$  1:1, та  $M_2$  1:4 в умовах земного тяжіння. У якості модельних рідин було використано, для:

- $M_1$  1:1 – вода дистильована;
- $M_2$  1:4 – керосин.

Подібність гідродинамічних процесів, що відбуваються під час спорожнення дослідних конструкцій в земних умовах, процесам, що відбуваються під час спорожнення натурних баків з паливом, в умовах космічного польоту, забезпечувалось рівністю безрозмірних комплексів (чисел): Фруда ( $Fr$ ), Рейнольдса ( $Re$ ), Струхаля ( $St$ ), та геометричної подоби [3].



а) фото процесу наповнення ДК М<sub>1</sub> 1:1 модельною рідиною; б) фото загального виду ДК М<sub>2</sub> 1:4; с) фото загального виду кінематичної моделі для гідродинамічних іспитів ДК М<sub>2</sub> 1:4

Рис. 4. Фото ДК М<sub>1</sub> 1:1, М<sub>2</sub> 1:4 та кінематичної моделі для гідродинамічних іспитів ДК М<sub>2</sub> 1:4

Результати іспитів по визначенню маси статичних гідравлічних ЗКП у ДК масштабів М<sub>1</sub> 1:1 та М<sub>2</sub> 1:4 для бічного ЗП, в залежності від числа Фруда (Fr), які були перераховані для натурних умов, наведено у рисунку 5.

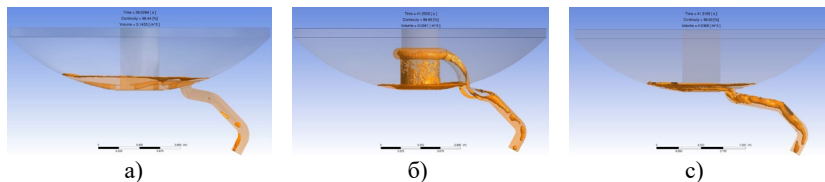
#### CFD моделювання.

Процес вирішення задачі по CFD моделюванню гідродинамічних процесів під час випорожнення баку і визначення ЗКП для ЗП в програмному пакеті обчислювальної гідродинаміки ANSYS Fluent складався з наступних етапів: побудова 3D моделі розрахункової області течії рідини; побудова розрахункової сітки; вибір математичної моделі розрахунку; завдання властивостей матеріалів; завдання початкових та граничних умов; завдання параметрів вирішувача; обчислювання; візуалізація, обробка і аналіз результатів обчислювання [4].

Точність та достовірність результатів CFD моделювання залежить від коректності виконання кожного етапу розрахунку.

При проведенні CFD моделювання було прийнято ряд спрощень та допущень (в основному при побудові 3D моделі), оскільки врахувати всі фактори, що впливають на поведінку рідини в натурних умовах польоту РН, практично не можливо.

Також, деяке погіршення точності CFD моделювання може бути пов'язане з потужністю наявної обчислювальної техніки, та обмеженням часового ресурсу.



а) бічний ЗП; б) сифонний ЗП; с) кільцевий ЗП

Рис. 5. Візуалізація процесу формування ЗКП у системі живлення РУ РН (момент занурення газової фази до входу у РУ) за результатами CFD моделювання

## Верифікація результатів CFD моделювання.

Результати CFD моделювання, як звичай, верифікуються даними фізичного експерименту.

Для порівняльного аналізу данні фізичного експерименту було нанесено на графік залежності маси ЗКП від числа  $Fr$ , разом з даними CFD моделювання, та даними попередніх розрахунків за емпіричними залежностями [1], [3] для бічного ЗП.

Значення чисел  $Fr$  та маси ЗКП наявні на рис. 6 наведені для повномасштабного баку пального (разом з ВМ), та натурних умов польоту на момент занурення газової фази до входу у РУ.

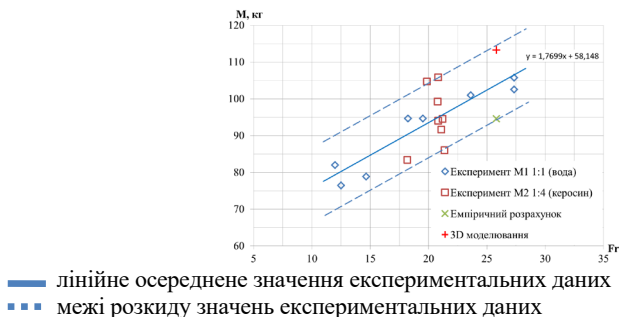


Рис. 6. Графік залежності маси ЗКП на момент занурення газової фази до входу у РУ від числа  $Fr$  для бічного ЗП

Як ми бачимо з рис. 6 значення ЗКП для бічного ЗП отримане методом CFD моделювання знаходиться у межах розкиду значень експериментальних даних. Мас плюсове відхилення відносно лінії осереднення експериментальних даних, яке дорівнює  $\approx 9\%$  (середньо апроксимоване за результатами експерименту значення ЗКП дорівнює 104 кг, при  $Fr=25,81$ ), при загальному відхиленні розкиду значень експериментальних даних  $\approx \pm 12\%$ .

Це свідчить о дотриманні гідродинамічної подоби при CFD моделюванні, та підтверджує коректність виконання поставлених задач чисельного експерименту.

Прийняті при проведенні CFD моделювання спрощення і допущення, які мають вплив на поведінку рідини під час дійсних умов польоту РН, та необхідність погіршення точності, походзячи з потужності наявної обчислювальної техніки, та обмеженням часового ресурсу – суттєво не вплинули на достовірність отриманих результатів, тому, що вони підтверджуються даними фізичного експерименту.

Це дає можливість стверджувати, що отримані результати CFD моделювання гідродинамічних процесів під час випорожнення баку і визначення ЗКП для сифонного та кільцевого ЗП – також є дійсними.

## Аналіз.

Результати розрахункових значень статичного гідравлічного ЗКП, яке визначається для системи живлення РУ РН ( $M''$ ), результати CFD моделювання

( $M''_{CFD}$ ) для всіх трьох варіантів ЗП, їх середнє відхилення від розрахункових значень ( $\sigma$ ), та зміна маси корисного вантажа ( $\Delta M''_{CFD}$ ) [5], наведені у таблиці 1.

Таблиця 5

Значення статичного гідравлічного ЗКП, та зміна маси корисного вантажа

№	Параметр	$M''$ , кг	$M''_{CFD}$ , кг	$\sigma$ , %	Зміна маси корисного вантажа $\Delta M''_{CFD}$ , кг
1	Існуюча конструкція бічного ЗП	94,56	113,28	20,8	0
2	Сифонний ЗП	32,87	26,96	18,0	+5,4
3	Кільцевий ЗП	47,48	29,09	38,7	+5,2

### Висновки

Результати проведених розрахунково-аналітичних та експериментах робіт засвідчили, що ЗКП найменший, а зміна маси корисного вантажа найбільша, у разі використання сифонного ЗП.

При цьому, застосування при виконанні проектно-конструкторських робіт з розробки, оптимізації та вдосконалення, замість повсюдного використання емпіричних та напівемпіричних залежностей, методів CFD моделювання, дозволяє: отримувати більш точні результати; скоротити кількість ДК, що повинно бути використано; скоротити необхідну кількість випробувань; скоротити тривалість проведення іспитів; скоротити сукупну тривалість обчислювальних та проектно-експериментальних робіт; скоротити загальні матеріально-технічні витрати і, як наслідок, здешевити кінцеву вартість продукту розробки, що підвищить його конкурентоспроможність.

### Список літератури

1. Кузьміч І.Ю. Вибір оптимальної конструкції забірного пристрою у баку пального першого ступеню ракети-носія «Диклон-4» / І.Ю. Кузьміч, О.М. Мінай // Авіаційно-космічна техніка й технологія. – Харків, 2022. – №1. – С. 25.
2. Шевченко Б. А. Расчетный и экспериментальный метод разработки средств забора компонентов топлива из баков летательных аппаратов с жидкостным ракетным двигателем : дис. канд. тех. наук : 05.07.02 / Б. А. Шевченко – Днепропетровск, КБ «Южное», 1990. – 209 с.
3. Микишев Г.Н. Экспериментальные методы в динамике космических аппаратов / Г.Н. Микишев. – М. : Машиностроение, 1978. – 248 с.
4. Зиганшин А.М. Вычислительная гидродинамика. Постановка и решение задач в процессоре Fluent: Методическое пособие для аспирантов специальности 05.23.03 / А.М. Зиганшин – Казань: Изд-во Казанск. гос. архитект.-строит. ун-та, 2013. – 79 с.
5. Блізниченко В. В. Проектування і конструкція ракет-носіїв: підручник / В. В. Блізниченко, Є. О. Джур, Р. Д. Краснікова, Л. Д. Кучма, А. К. Лінник [та ін.]; за ред. акад. С. М. Конюхова. – Д. : Вид-во ДНУ, 2007. – 504 с.