

УДК 629.764:621.454.2.046.2

doi: 10.32620/aktt.2022.1.03

І. Ю. КУЗЬМІЧ, О. М. МІНАЙ

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

ВИБІР ОПТИМАЛЬНОЇ КОНСТРУКЦІЇ ЗАБІРНОГО ПРИСТРОЮ У БАКУ ПАЛЬНОГО ПЕРШОГО СТУПЕНЮ РАКЕТИ-НОСІЯ «ЦИКЛОН-4»

Залишки компонентів ракетного палива у баках у кінці роботи ступеня ракети-носія (РН) значною мірою впливають на її енергетичні характеристики. Забірні пристрої, якими обладнано баки сучасних РН, забезпечують неперервну подачу компонентів палива із баку до рушійної установки без порушення суцільності потоку і мінімізують залишки компонентів палива. У баку пального РН наявність тунельного трубопроводу ускладнює, а у певних випадках виключає, можливість забору палива із полюса бака. Вирішити задачу забору пального у цьому випадку дозволяє використання бічного забірної пристрою. Проте такий пристрій за рахунок зміщення відносно полюсу днища бака на певний кут може призводити до нерівномірного за рівнем прориву газу до входу у витратну магістраль і, як наслідок, значному збільшенню залишків компонентів палива. Авторами проведено пошук і обґрунтування оптимальної конструкції бічного забірної пристрою на прикладі баку пального першого ступеня РН «Циклон-4», який обладнано таким забірним пристроєм у вигляді профільованої таріли. Розглянуто конструкції сифонного і кільцевого забірних пристроїв, проведено розрахунок їх основних параметрів і порівняльний аналіз зміни енергетичних характеристик РН у залежності від вибраної конструкції. Визначена ефективність роботи забірних пристроїв, що розглядаються, за параметром висоти провалу рівня ($H_{кр}$) в статичних умовах, яке безпосередньо визначає масу залишків, що не виробляються. Результатом проведених розрахунково-аналітичних робіт стало отримання найбільш оптимального варіанту забірної пристрою, яким за декількома параметрами виявився сифонний забірний пристрій. Впровадження в конструкцію пального баку РН «Циклон-4» бічного сифонного забірної пристрою, що є більш досконалим, дозволить підвищити енергетичні характеристики РН за рахунок збільшення ваги корисного вантажу, який виводиться, на 4,4 кг.

Ключові слова: залишки компонентів палива; забірний пристрій; рушійна установка; паливний бак; компоненти палива.

Вступ

На енергетичні характеристики сучасних ракет-носіїв (РН) значною мірою впливають залишки компонентів ракетного палива у баках у кінці роботи ступеня. Залишки компонентів палива (ЗКП) – це кількість компонентів палива (КП) у системі живлення рушійної установки (РУ), які не можливо виробити через порушення вимог щодо суцільності, тиску, температури КП на вході в РУ, а також через конструктивні особливості баку і витратної магістралі.

Забірний пристрій (ЗП) – важливий елемент пального баку, який забезпечує неперервну подачу КП із баку до РУ без порушення суцільності потоку (без газових включень), тобто максимальне їх вироблення.

В процесі проектування паливних баків і систем живлення КП до двигуна, як для нижніх ступенів [1, 2], так і для космічних ступенів РН [3, 4] важливим є питання вибору найбільш оптимального типу ЗП. Це в подальшому визначатиме: терміни проектування ЗП; обсяг та термін експерименталь-

ного відпрацювання (фізичного і чисельного) [5, 6]; потрібну для експериментального відпрацювання матеріально-технічну частину; енергетичні характеристики РН (за рахунок залишків КП), і, як наслідок, загальні часові і матеріально-технічні витрати на розробку ЗП і РН в цілому [7, 8].

Основним параметром, який визначає ефективність роботи ЗП, є критична висота провалу рівня КП ($H_{кр}$) в статичних умовах. Вона являє собою висоту рівня рідини у баку, для якого відбувається прорив газу у витратну магістраль. Від значення $H_{кр}$ безпосередньо залежить маса залишків, які не виробляються.

1. Постановка задачі

У баках пального наявність тунельного трубопроводу ускладнює можливість забору палива із полюса бака.

Ціллю дослідницької роботи, наведеної в даній статті, є пошук і вибір оптимальної конструкції ЗП у баку з наявністю тунельного трубопроводу, який забезпечує підвищення енергетичних характеристик РН.

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

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

Розглянемо вибір оптимальної конструкції ЗП на прикладі баку пального першого ступеня РН «Циклон-4», який було обладнано бічними ЗП у вигляді профільованої таріли. Для усунення недоліків, притаманних бічному ЗП, розглянемо інші можливі конструктивні схеми ЗП, виконаємо розрахунки їх основних параметрів і порівняльний аналіз зміни енергетичних характеристик РН в залежності від вибраної конструкції.

За наявності у баку пального РН тунельної труби, малій відстані між входом у двигун і днищем баку, потреби роздільного живлення кількох двигунів із одного баку для забезпечення живлення РУ КП крім бічного ЗП у вигляді профільованої таріли (існуюча схема) може бути застосовано:

- сифонний ЗП;
- кільцевий ЗП.

1.1. Бічний ЗП

Існуючу принципову конструктивну схему бічного ЗП у баку пального першого ступеня РН «Циклон-4» наведено на рисунку 1.

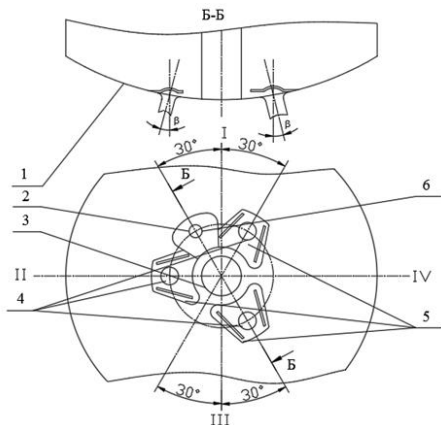


Рис. 1. Принципова конструктивна схема бічного ЗП, у баку пального першого ступеня РН «Циклон-4»:

- 1 – днище баку;
- 2 – вхід у витратну магістраль рульової РУ;
- 3 – тунельна труба;
- 4 – входи у витратні магістралі маршової РУ;
- 5 – таріли ЗП живлення маршової РУ;
- 6 – таріли ЗП живлення рульової РУ.

Для розглянутої конструкції $H_{кр}$ залежить від діаметру таріли, висоти її встановлення відносно полюсу днища, форми нижнього днища, витрат компоненту палива із баку і поздовжнього прискорення до моменту вимкнення РУ. Визначення $H_{кр}$ здійснювалося за методикою [11], яка ґрунтується на результатах експериментального відпрацювання. Згідно з проведеними розрахунками, конструкція бічного ЗП у баку пального, яка розглядається, забезпечує:

– для маршової РУ $H_{кр} = 177$ мм (і відповідну масу залишків пального $M_{зал} = 139,23$ кг);

– для рульової РУ $H_{кр} = 147$ мм ($M_{зал} = 98,28$ кг).

Масові значення ЗКП відповідають середньомасовій температурі палива 20°C .

1.2. Сифонний ЗП

Сифонний ЗП за наявності в баку тунельної труби, вісь якої співпадає з віссю баку, дозволяє організувати фактично центральний (з невеликим зміщенням відносно осі баку) забір.

Використання сифонного ЗП не потребує доопрацювання конструкції бічних ЗП живлення маршової РУ, оскільки значення залишків КП визначається на момент вимкнення рульової РУ в кінці польоту ступеню (за циклограмою роботи першого ступеня РН «Циклон-4» маршова РУ вимикається першою), тобто $H_{кр} = 147$ мм є визначальною.

На рисунку 2 наведено розрахункову схему сифонного ЗП у баку пального, яка забезпечує живлення рульової РУ

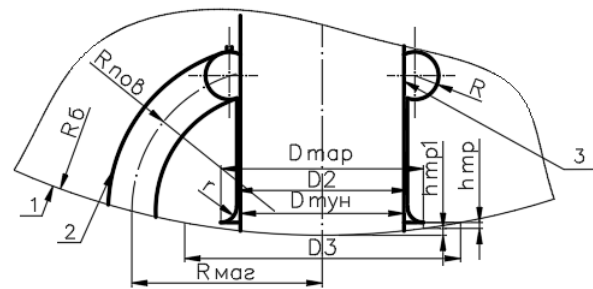


Рис. 2. Розрахункова схема сифонного ЗП у баку пального, який забезпечує живлення рульової РУ:

- 1 – днище баку;
- 2 – вхід до витратної магістралі рульової РУ;
- 3 – тунельна труба.

Основні параметри для розрахунку обирались за методиками і рекомендаціями, наведеними в [9, 10].

Результати розрахунку параметрів сифонного ЗП наведено у таблиці 1.

Таблиця 1
Основні параметри сифонного ЗП

Найменування параметру	Параметр	Значення параметру
Радіус сфери нижнього днища баку	R_6 , мм	2000
Радіус повороту магістралі	$R_{пов}$, мм	375
Радіус кільця торової частини сифона	R , мм	62,5
Радіус закруглення таріли	r , мм	42
Діаметр тунельної труби	$D_{тун}$, мм	430
Діаметр циліндричної частини сифону	D_2 , мм	448
Діаметр таріли сифону	$D_{тар}$, мм	532
Діаметр перетину сферичного днища баку на рівні установки таріли сифону	D_3 , мм	724
Відстань від таріли сифону до днища баку на діаметрі D_3	$h_{тр}$, мм	15,4
Відстань від таріли до теоретичного полюсу баку	$h_{тр1}$, мм	17,8

Критична висота провалу рівня $H_{кр}$ розраховувалась за формулою [11]:

$$H_{кр} = R_6 \cdot \left[\left(2 \cdot \bar{h}_п - \bar{h}_п^2 \right)^{0,5} - \bar{R}_{тар} \right] \cdot 0,82 \cdot \text{th} \left(0,71 \cdot Fr^{0,45} \right) + (h_{тр1} + h_{тр}), \quad (1)$$

$$\text{де } \bar{h}_п = \frac{h_{тр} + h_{тр1}}{R_6}, \quad (2)$$

$$\bar{R}_{тар} = \frac{D_{тар}}{2 \cdot R_6}, \quad (3)$$

$$Fr = \frac{W^2}{n_x \cdot g \cdot R_6 \cdot (1 - \bar{R}_{тар})}, \quad (4)$$

де $\bar{h}_п$ – відносна висота установки таріли сифону;

$\bar{R}_{тар}$ – відносний радіус таріли сифону;

Fr – число Фруда;

n_x – повздовжнє перевантаження ($n_x=0,5$);

g – прискорення вільного падіння;

W – швидкість підтікання рідини на рівні установки таріли.

$$W = \frac{Q}{F}, \quad (5)$$

де Q – об'ємні витрати рідини ($Q=50 \text{ дм}^3/\text{с}$);

F – площа прохідного перетину на рівні установки таріли, яка визначається за формулою

$$F = \frac{\pi \cdot (D_3^2 - D_{тар}^2)}{4}. \quad (6)$$

У результаті розрахунків отримано значення $H_{кр}$ (в статичних умовах) на момент виключення рульової РУ, яке складає:

$$H_{кр} = 40 \text{ мм}. \quad (7)$$

Масове значення залишків КП у статичних умовах $M_{зал}^{стат}$, яке відповідає висоті провалу рівня $H_{кр}$ дорівнює:

$$M_{зал}^{стат} = 8,69 \text{ кг}.$$

Для вибраної конструкції сифонного ЗП також треба врахувати конструктивний залишок палива у порожнині сифону, який складає:

$$M_{зал}^к = 22,91 \text{ кг}.$$

Він визначається кількістю пального в застійних зонах баку, витратних магістралей, колекторів, зокрема в магістралях циркуляції, пуско-відсічних, клапанах заправлення, компоненту, який не злився із порожнин таріли на момент виключення РУ.

1.3. Кільцевий ЗП

Розглянемо варіант впровадження кільцевого ЗП для живлення рульової РУ. Кільцевий ЗП забезпечує рівномірне зниження рівня КП у баку і не викликає його закрутку [11, 12].

Основні параметри для розрахунку визначались за методикою і рекомендаціями, які наведено у [11].

Розрахунок площі зливних отворів кільцевого ЗП з одним напірним жолобом починається з вибору швидкості течії W_k пального у жолобі витратної магістралі. Вибір W_k відбувається виходячи з умов забезпечення:

– оптимальних втрат уздовж тракту живлення РУ;

– мінімальної маси баку і системи наддування.

Площа жолобу S знаходиться за значенням W_k :

$$\Delta = 2 \cdot R_a, \quad (14)$$

$$S = \frac{\dot{V}_0}{W_k}, \quad (8)$$

де Δ – шорсткість, R_a – середньоарифметична шорсткість;

де $\dot{V}_0$ – витрати в жолобі.

Периметр середньої лінії жолобу розбиваємо на $2n$ рівних ділянок довжиною l_i (де n приймаємо рівним 5) таким чином, щоб виконувалася нерівність

$$\frac{l_i}{D} \leq 5,$$

де D – гідравлічний діаметр перетину жолобу.

Для початкової ділянки площа зливних отворів $S_{зп}$ та їх діаметр визначається за максимальною кількістю отворів, які можливо розмістити на цій стороні.

Знаходимо приєднанні витрати $\dot{V}_{пр}$ на розрахункових ділянках у випадку рівномірного зниження рівня КП у баку

$$\dot{V}_{пр} = \frac{\dot{V}_0}{2 \cdot n}. \quad (9)$$

Середню швидкість течії КП у зливних отворах початкової ділянки визначимо наступним чином

$$W_{зп} = \frac{\dot{V}_{пр}}{S_{зп}}. \quad (10)$$

Коефіцієнт втрат напору одиничного отвору знаходимо у відповідності до [13]:

$$\xi_{зп} = f1(\bar{\delta}; Re_{п}), \quad (11)$$

$$\bar{\delta} = \frac{\delta}{D_0},$$

де δ – протяжність отвору, D_0 – діаметр отвору.

За відомими геометричними розмірами жолобу, чистоті обробки його внутрішньої поверхні визначимо коефіцієнт гідравлічних втрат напору на тертя:

$$\xi_{трн} = \lambda_n \cdot \frac{l_i}{D}, \quad (12)$$

$$\lambda_n = 0,0283 \cdot \sqrt{\frac{D}{R_0}} + 0,1 \cdot \left(1,46 \cdot \frac{\Delta}{D} + \frac{100}{Re_{п}}\right)^{0,25}, \quad (13)$$

де R_0 – кривизна середньої лінії жолобу;

D – гідравлічний діаметр жолобу;

$$Re_{п} = \frac{\dot{V}_{пр} \cdot D}{2 \cdot S \cdot \nu}. \quad (15)$$

Значення коефіцієнту втрат напору $\xi_{п}$ на початковій ділянці жолобу знаходимо за залежністю [2]

$$\xi_{п} = f2(Re_{п}; \frac{S_{зп}}{S}). \quad (16)$$

Падіння напору на початковій ділянці жолобу $p_{п}$ знаходимо за формулою:

$$p_{п} = \left[\xi_{п} + \xi_{зп} \cdot \left(\frac{S}{S_{зп}} \right)^2 + \xi_{трн} + 1 \right] \cdot \frac{\rho \cdot \dot{V}_{пр}^2}{2 \cdot S^2}. \quad (17)$$

Падіння напору за рахунок приєднаних витрат для ділянок жолобу $2 \leq i \leq n$, а також зміни швидкості і опору тертя знаходимо, використовуючи рівняння:

$$\Delta p_{при} = \frac{\rho}{2 \cdot S^2} \cdot (2 + \gamma_i) \cdot V_{пр} \cdot (2 \cdot \dot{V} - \dot{V}_{пр}), \quad (18)$$

$$V_i = i \cdot \dot{V}_{пр}, \quad (19)$$

$$\gamma_i = 0,9 - 7,67 \cdot e^{-0,71 \cdot Eu_i}, \quad (20)$$

де γ – коефіцієнт втрат напору за рахунок приєднаних витрат,

$$Eu_i = \frac{S^2}{\rho \cdot \dot{V}_{i-1}^2} \cdot (p_{i-1} + p_i), \quad (21)$$

$$\Delta p_{три} = \frac{\rho \cdot \lambda_i}{6 \cdot S^2} \cdot \frac{l_i}{D} \cdot (3 \cdot \dot{V}_i^2 - 3 \cdot V_i \cdot \dot{V}_{пр} + \dot{V}_{пр}^2), \quad (22)$$

$$\lambda_i = 0,0283 \cdot \sqrt{\frac{D}{R_0}} + \lambda_{три} - 2 \cdot \left(\frac{2 \cdot \dot{V}_i}{V_{пр}} - 1 \right)^{-1} \cdot \frac{S}{S_{пi}}, \quad (23)$$

$$\lambda_{три} = 0,1 \cdot \left(1,46 \cdot \frac{\Delta}{D} + \frac{100}{Re_i} \right)^{0,25}, \quad (24)$$

$$Re_i = \left(\dot{V}_i - \frac{\dot{V}_{пр}}{2} \right) \cdot \frac{D}{S \cdot \nu}, \quad (25)$$

$$\Delta p_{mi} = \xi_{mi} \cdot \frac{\rho \cdot \dot{V}_i^2}{2 \cdot S^2}, \quad (26)$$

$$P_i = P_{\Pi} + \sum_{i=2}^n (\Delta p_{при} + \Delta p_{тр} + \Delta p_{mi}). \quad (27)$$

У разі $\lambda_i < 0$ приймаємо, що $\lambda_i = 0$.

Методом послідовних наближень знаходимо падіння напору у жолобі від приєднаних витрат і зміни швидкості ($\Delta p_{при}$) за рівняннями (11) – (13).

Згідно падіння напору у жолобі із рівняння (22) розраховуємо площу зливних отворів на ділянці $2 \leq i \leq n$ за залежностями:

$$S_i = \dot{V}_{пр} \cdot \left(\frac{\rho \cdot \xi_{zi}}{P_{i-1} + P_i + 2 \cdot \rho \cdot g \cdot \delta} \right)^{0,5}, \quad (28)$$

$$\xi_{zi} = \xi_{oi} \cdot \bar{\xi}_{zi}, \quad (29)$$

$$\bar{\xi}_{zi} = 0,53 + 0,26 \cdot \bar{\delta} + \frac{\bar{\delta}^2}{0,07 - 0,03 \cdot \bar{\delta} + \bar{\delta}^2}. \quad (30)$$

$$\bar{\xi}_{zi} = \frac{-(1,5 - 0,6 \cdot \bar{\delta}) \cdot \frac{S}{S_{zi} \cdot Eu_i}}{e}, \quad (31)$$

де ξ_{zi} – визначаємо за довідковими даними для одиничного отвору [13];

$$Re_{zi} = \frac{\dot{V}_{пр} \cdot d_{zi}}{S_{zi} \cdot \nu}, \quad (32)$$

де значення $\xi_{zi} = f1(\bar{\delta}_i; Re_{zi})$ визначаємо за довідковими даними для одиничного отвору [13].

Початкові дані для розрахунку кільцевого ЗП живлення рульової РУ наведено в таблиці 2, а його розрахункова схема на рисунку 3.

Таблиця 2

Початкові дані для розрахунку кільцевого ЗП

$\dot{V}$, дм ³ /с	W_K , м/с	$\nu \cdot 10^6$, м ² /с	Δ , мм	ρ , кг/м ³
50	4,08	2,05	0,04	790,5

Результати розрахунку площі жолобу приєднаних витрат на початковій ділянці жолобу за формулами (8) – (17) наведено в таблиці 3.

Результати розрахунку падіння напору від приєднаних витрат для ділянок жолобу $2 \leq i \leq n$ за формулами (18) – (27) наведено в таблиці 4.

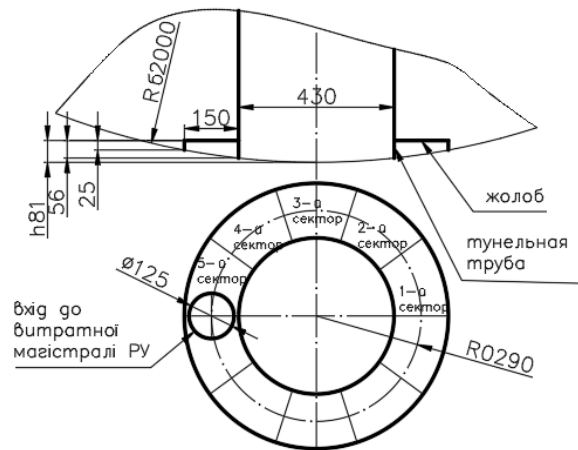


Рис. 3. Розрахункова схема кільцевого ЗП

Таблиця 3

Параметри жолобу на початковій ділянці

S, мм	D, мм	$\dot{V}_{пр}$, дм ³ /с	$S_{зп}$, мм ²	$\xi_{зп}$	$\xi_{п}$	$\xi_{трн}$	$P_{п}$, Па
6100	88	5	10187	1,8	2	0,101	1023

Таблиця 4

Падіння напору за рахунок приєднаних витрат для ділянок жолобу $2 \leq i \leq n$

Параметр	Сектор				
	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й
P, Па	1023	3407,95	7125,52	11945,56	17742,46

Результати розрахунку площі і кількості зливних отворів на ділянці $2 \leq i \leq n$ за формулами (28) – (32) наведено в таблиці 5.

Таблиця 5

Площа і кількість зливних отворів

Параметр	Сектор				
	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й
Площа отворів S_{ci} , мм ²	10187	2534	1571	1134	895
Кількість отворів діаметром 10 мм	130	32	20	14	11

Визначимо критичну висоту провалу рівня над пластиною ЗП ($H_{кр}^1$) за формулою:

$$H_{кр}^1 = d_3 \cdot Fr_3^{0,285}, \quad (33)$$

де d_3 – діаметр зливних отворів і $d_3 = 10$ мм;

$$Fr_3 = \frac{W_{3\max}^2}{n \cdot g \cdot d_3}, \quad (34)$$

де $W_{3\max}$ – максимальна швидкість у зливних отворах;

n – перевантаження;

g – прискорення вільного падіння.

Зниження рівнів однакове у всіх секторах. При цьому площа зливних отворів мінімальна в останньому 5-му секторі. Тому $W_{3\max}$ знаходимо за наступною формулою:

$$W_{3\max} = \frac{4 \cdot \dot{V}_{\text{пр}}}{\pi \cdot d_3^2 \cdot N_5}, \quad (35)$$

де N_5 – кількість отворів в 5-му секторі.

В результаті розрахунку було отримано:

$$W_{3\max} = 5,79 \text{ м/с};$$

$$Fr_3 = 683,5 ;$$

$$H_{\text{кр}}^1 = 23,2 \text{ мм.}$$

Знайдемо значення критичної висоти провалу рівня відносно полюсу баку ($H_{\text{кр}}$) за формулою:

$$H_{\text{кр}} = H_{\text{кр}}^1 + h,$$

де $h = 81 \text{ мм}$;

$$H_{\text{кр}} = 104 \text{ мм.}$$

Масове значення залишків КП у статичних умовах $M_{\text{зал}}^{\text{стат}}$, яке відповідає висоті провалу рівня $H_{\text{кр}}$ дорівнює:

$$M_{\text{зал}}^{\text{стат}} = 47,4 \text{ кг.}$$

2. Аналіз

На основі результатів розрахунково-аналітичних робіт було зроблено порівняльний аналіз значень $H_{\text{кр}}$ конструкцій ЗП, які розглядаються:

– бічного ЗП у вигляді профільованої таріли (існуюча схема);

– сифонного ЗП;

– кільцевого ЗП.

Значення величини критичної висоти провалу рівня КП і ЗКП у баку пального першого ступеня РН «Циклон-4», при впровадженні різних схем ЗП, наведено у таблиці 6.

Таблиця 6

Значення величини критичної висоти провалу рівня КП і значення ЗКП у баку пального

№	Параметр	$H_{\text{кр}}$, мм	$M_{\text{зал}}^{\text{стат}}$, кг	$M_{\text{зал}}^{\text{к}}$, кг	$M_{\text{зал}}^{\text{сум}}$, кг
1	Існуюча конструкція бічного ЗП живлення рульової РУ	147	94,8	–	94,8
2	Сифонний ЗП живлення рульової РУ	40	8,69	22,91	31,6
3	Кільцевий ЗП живлення рульової РУ	104	47,4	–	47,4

Із таблиці 6 виходить, що найменшу масу ЗКП забезпечує сифонний ЗП.

Виходячи із отриманих значень ЗКП у баку пального для розглянутих варіантів ЗП, за методикою і рекомендаціями, які наведені у [14], визначено зміну енергетичних характеристик РН «Циклон-4». Для цього оцінювалася зміна маси корисного вантажу, яке може бути виведено РН на опорну орбіту відносно існуючого бічного ЗП. В таблиці 7 наведено значення зміни маси корисного вантажу, який виводиться, у випадку впровадженні сифонного і кільцевого ЗП відносно бічного.

Висновки

Результати проведених розрахунково-аналітичних робіт засвідчили, що $H_{\text{кр}}$ і ЗКП найменші для сифонного ЗП.

Основними перевагами запропонованого сифонного ЗП є:

– зменшення критичної висоти провалу рівня пального зі 147 мм (для існуючого бічного ЗП) до 40 мм;

– зменшення розрахункового значення статичного ЗКП у баку пального до 31,6 кг, замість 94,8 кг для існуючого бічного ЗП (різниця складає $\Delta = 63,2 \text{ кг}$ і є суттєвою).

- забезпечення рівномірного зниження рівня КП у баку;
- зменшення динамічної складової сумарного залишку, як наслідок зменшення $H_{кр}$ завдяки центральному забору компоненту палива.

Таблиця 7

Зміна маси корисного вантажу, який виводиться, у разі впровадження сифонного і кільцевого ЗП відносно бічного

№	Параметр	Зміна маси корисного вантажу, кг
1	Бічний ЗП живлення рульової РУ (існуючий)	0
2	Сифонний ЗП живлення рульової РУ	+4,424
3	Кільцевий ЗП живлення рульової РУ	+3,318

Крім того, використання такого ЗП для рульової РУ не потребує доопрацювання у баку пального ЗП маршової РУ.

У підсумку впровадження в конструкцію паливного баку РН «Циклон-4» бічного сифонного ЗП, який є більш досконалим, дозволить підвищити енергетичні характеристики РН шляхом збільшення маси корисного вантажу, який виводиться на опорну орбіту, на 4,4 кг.

Подальші роботи

У подальшому планується:

- проведення чисельного моделювання гідродинамічних процесів під час випорожнення баку і визначення залишків для бічного ЗП за допомогою ANSYS Fluent;
- верифікація чисельного моделювання за результатами фізичного експерименту;
- проведення чисельного моделювання гідродинамічних процесів під час випорожнення баку і визначення залишків для кільцевого та сифонного ЗП;
- проведення порівняльного аналізу і підтвердження оптимальної конструкції ЗП за результатами чисельного моделювання.

Література

1. Баранов, Д. А. Типовые решения в проектировании и конструировании элементов ракетносителей [Text] : учеб. пособие / Д. А. Баранов, В. Д. Еленев. – Самара : Издательство Самарского университета, 2020. – 112 с.

2. Design of the Europa Clipper Propellant Management Device [Text] / R. E. Manning, Ian Ballinger, Manoj Bhatia, and Mack Dowdy // American Institute of Aeronautics and Astronautics AIAA Propulsion and Energy Forum, 19-22 August 2019. – Indianapolis, 2019. – 19 p. DOI:10.2514/6.2019-3858.

3. Minai, Oleksandr. Influence of long-term stay elements of capillary intake devices in liquid propellant components on their parameters [Text] / Oleksandr Minai, Oleg Ivanov, Ihor Siedyk // Aerospace Research in Bulgaria. – 2020 – Vol. 32. – P. 175-192. DOI: 10.3897/arb.v32.e15.

4. Минай, А. Н. Применение методов численного моделирования при экспериментальной отработке заборных устройств центрального типа [Text] / А. Н. Минай, И. В. Седых, И. Ю. Кузьмич // Авиационно-космическая техника и технология. – 2019. – № 6(158). – С. 33–41. DOI: 10.32620/akt.2019.6.05.

5. Experimental study on liquid distribution in a vane type propellant tank [Text] / Liu Jintao, Li Yong, Li Wen, Chen Lei and Guo Chongwu // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1314. – 8 p. DOI: 10.1088/1742-6596/1314/1/012097.

6. Numerical simulation and microgravity experiment of fluid flow in the vane type tank [Text] / Lei Chen, Jintao Liu, Wen Li, Can Yao and Honglai Zhu // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 542. – 8 p. DOI: 10.1088/1757-899X/542/1/012012.

7. Chen, Shangdong. Study on propellant management device in plate surface tension tanks [Text] / Shangdong Chen, Li Duan, Qi, Kang // Research paper: Acta Mechanica Sinica. – 2021. – 11 p. DOI: 10.1007/s10409-021-01121-y.

8. Design & Development of Propellant Intake Device for Cryo Upper Stage LOX Tank [Text] / Aamir Yusuf, P. K. Gopinathanb, K. Kamatchi, Paul Jose, G. Nageswaran, V. Narayanan // 71st International Astronautical Congress (IAC): The CyberSpace Edition, 12-14 October 2020. – virtual. – 12 p. Paper code: IAC-20, C4,2,2,x57098.

9. Беляев, Н. М. Расчет пневмогидравлических систем ракеты [Текст] / Н. М. Беляев. – М. : Машиностроение, 1983. – 223 с.

10. Токарев, В. Е. Истечение жидкости из емкости с образованием воронки [Текст] / В. Е. Токарев // Известия высших учебных заведений. Сер. Авиационная техника. – 1967. – № 3. – С. 92 – 94.

11. 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.

12. Abramson, Y. N. Simulation of fuel sloshing characteristics in missile tanks by use of small models [Text] / Y. N. Abramson, G. E. Ranaleben. // ARS Journal. – 1960 – Vol. 30, No. 7. – P. 603-613.

13. Идельчик, И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям [Текст] / И. Е. Идельчик. – 3-е изд. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.

14. Проектування і конструкція ракет-носіїв [Текст]: 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.

References

1. Baranov, D. A., Eleneev, V. D. *Tipovye resheniya v proektirovanii i konstruirovani elementov raket nositelei* [Standard decisions in design and designing of elements of launch vehicle]. Samara, Yzdatel'stvo Samarskogo universyteta Publ., 2020. 112 p.

2. Manning, R. E., Ballinger, Ian., Bhatia, Manoj., Dowdy, Mack. Design of the Europa Clipper Propellant Management Device. *American Institute of Aeronautics and Astronautics AIAA Propulsion and Energy Forum*, Indianapolis, 19-22 August 2019. 19 p. DOI: 10.2514/6.2019-3858.

3. Minai, Oleksandr., Ivanov, Oleg., Siedykh, Ihor. 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.

4. Minai, A. N., Siedykh, I. V., Kuzmich, I. Yu. Primenenie metodov chislennogo modelirovaniya pri eksperimental'noi otrabotke zabornykh ustroystv tsentral'nogo tipa [Application of methods of numerical modeling at experimental working off of intakes of the central type]. *Aviacionno-kosmichna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2019, no. 6 (158), pp. 33-41. DOI: 10.32620/aktt.2019.6.05.

5. Jintao, Liu., Yong, Li., Wen, Li., Lei, Chen and Chongwu, Guo. Experimental study on liquid distribution in a vane type propellant tank. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1314. 8 p. DOI: 10.1088/1742-6596/1314/1/012097.

6. Chen, Lei., Liu, Jintao., Li, Wen., Yao, Can and Zhu, Honglai. Numerical simulation and microgravity experiment of fluid flow in the vane type tank. *IOP*

Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, vol. 542. 8 p. DOI: 10.1088/1757-899X/542/1/012012.

7. Chen, S., Duan, L., Kang, Q. Study on propellant management device in plate surface tension tanks. *Research paper: Acta Mechanica Sinica*, 2021. 11 p. DOI: 10.1007/s10409-021-01121-y.

8. Yusuf, A., Gopinathanb, P. K., Kamatchi, K., Jose, P., Nageswaran, G., Narayanan, V. Design & Development of Propellant Intake Device for Cryo Upper Stage LOX Tank. *71st International Astronautical Congress (IAC): The CyberSpace Edition*, virtual, 12-14 October 2020, 12 p. Paper code: IAC-20,C4,2,2,x57098.

9. Beljaev, N. M. *Raschet pnevmogidravlicheskih sistem rakety* [Calculation of rocket pneumohydraulic systems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1983. 223 p.

10. Tokarev, V. E. Istechenie zhidkosti iz emkosti s obrazovaniem voronki [The outflow of liquid from the tank with the formation of a funnel]. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Aviacionnaja tehnika*, 1967, no. 3, pp. 92-94.

11. 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 «Juzhnoe» Publ., 1990. 209 p.

12. Abramson, Y. N., Ranaleben, G. E. Simulation of fuel sloshing characteristics in missile tanks by use of small models. *ARS Journal*, 1960, vol. 30, no. 7, pp. 603-613.

13. Idel'chik, I. E. *Spravochnik po gidravlicheskim soprotivlenijam* [Hydraulic Resistance Reference]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975. 558 p.

14. Bliznichenko, V. V., Dzbur, Ye. O., Krasnikova, R. D., Kuchma, L. D., Linnyk, A. N. *Proektuvannya i konstruktsiya raket* [Engineering and design of launch vehicles]. Dnepropetrovsk, DNU Publ., 2007. 504 p.

Надійшла до редакції 20.10.2021, розглянута на редколегії 16.02.2022

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ ЗАБОРНОГО УСТРОЙСТВА В БАКЕ ТОПЛИВА ПЕРВОЙ СТУПЕНИ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ «ЦИКЛОН-4»

И. Ю. Кузьмич, А. Н. Минай

Остатки компонентов ракетного топлива в баках в конце работы ступени ракеты-носителя (РН) в значительной степени влияют на ее энергетические характеристики. Заборные устройства, которыми обустроены баки современных РН, обеспечивают непрерывную подачу компонентов топлива из бака к двигательной установке без нарушения целостности потока и минимизируют остатки компонентов топлива. В баках топлива РН наличие туннельного трубопровода усложняет, а в некоторых случаях исключает, возможность забора топлива из полюса бака. Решить задачу забора компонентов топлива в этом случае позволяет использование бокового заборного устройства. Тем не менее, такое устройство за счет смещения относительно полюса днища бака на определенный угол может приводить к неравномерному по уровню прорыву газа до входа в расходную магистраль и, как следствие, существенному росту остатков компонентов топлива. Авторами проведен поиск и обоснование оптимальной конструкции бокового заборного устройства на примере

бака топлива первой ступени РН «Циклон-4», который обустроен таким заборным устройством в виде профилированной тарели. Рассмотрены конструкции сифонного и кольцевого заборных устройств, проведен расчет их основных параметров и сравнительный анализ изменения энергетических характеристик РН в зависимости от выбранной конструкции. Определена эффективность работы рассматриваемых заборных устройств по параметру высота провала уровня ($H_{кр}$) в статических условиях, который непосредственно влияет на массу не вырабатываемых остатков. Результатом проведенных расчетно-аналитических работ стало выявление наиболее оптимального варианта заборного устройства, которым по ряду параметров стало сифонное заборное устройство. Применение в конструкции топливного бака РН «Циклон-4» бокового заборного устройства, которое является наиболее совершенным, позволит повысить энергетические характеристики ракеты-носителя за счет увеличения массы выводимого полезного груза на 4,4 кг.

Ключевые слова: остатки компонентов топлива; заборное устройство; двигательная установка; топливный бак.

SELECTING OPTIMUM DESIGN OF CYCLONE-4 STAGE 1 PROPELLANT TANK INTAKE

I. Kuzmich, O. Minai

The residues of rocket propellant in tanks after the launch vehicle stage burnout have a substantial influence on the launch vehicle power budget. In modern launch vehicle tanks, the intakes maintain the continuous supply of propellants from a tank to the propulsion system, keeping the continuity of flow and minimizing the number of residual propellants. Tunnel pipelines in the launch vehicle propellant tanks make it complicated, or impossible in certain cases, to take in propellants from a tank pole. A lateral intake can be a solution to the issue of propellant intake in this situation. However, the displacement of such devices by a certain angle relative to the tank dome can cause blow-by fluctuations at the feed line inlet and, consequently, a much larger number of residual propellants. The analysis of an optimum lateral intake design was carried out and the authors explain the grounds for the design of a lateral intake shaped as a profiled plate, using as an example the third stage of the Cyclone-4 launch vehicle where a device of such a type is used. The siphon and annular designs of an intake are considered, the calculations of their key parameters were made, and a comparative analysis was done for the power budgets of launch vehicles with the considered intake designs. The effectiveness of the considered intake designs was determined by the value of the level drop depth (H_{cr}) under static conditions that directly define the mass of non-burnt propellant residues. The results of the conducted analysis and computations demonstrated the siphon intake to be the optimum design option by many parameters. The use of an upgraded lateral siphon intake in the Cyclone-4 propellant tanks will allow the payload to orbit to be 4.4 kg heavier, thereby resulting in a better power budget for the launch vehicle.

Keywords: propellant residues; intake; propulsion system; propellant tank.

Кузьміч Ірина Юріївна – інженер-конструктор 1 категорії, ДП «КБ «Південне» ім. М. К. Янгеля», Дніпро, Україна.

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

Iryna Kuzmich – category 1 design engineer in Yuzhnoye State Design Office, Dnipro, Ukraine, e-mail: kuzmichyu82@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3944-2602.

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