

Д. О. Удовиченко ORCID.org/0009-0006-6431-0982, А. О. Макаренко

АНАЛІЗ СИЛ ОПОРУ, ЯКІ ВИНИКАЮТЬ У ПРОЦЕСІ РОЗДІЛЕННЯ СТУПЕНІВ, І ЇХ МІНІМІЗАЦІЯ. МОЖЛИВІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ ОДНОГО ПНЕВМОШТОВХАЧА ДЛЯ РОЗДІЛЕННЯ СТУПЕНІВ

Одне з основних завдань під час проектування систем розділення ступенів полягає у створенні системи з мінімальною масою, що забезпечить потрібну відносну швидкість розділення ступенів, мінімальну різницю тяговості і виключить забруднення поверхонь космічних апаратів. За результатами розв'язання оптимізаційної задачі один із найоптимальніших варіантів – застосування одного пневмоштовхача для розділення ступенів, що забезпечить зменшення маси системи розділення у декілька разів за рахунок значного зменшення маси магістралей, сумарної маси пневмоштовхачів, маси газових балонів і елементів їх кріплення.

Для попередньої оцінки процесу розділення і визначення можливості застосування одного пневмоштовхача для розділення ступенів було розроблено математичну модель у вигляді системи диференціальних рівнянь, яка описує процес розділення ступенів і проведений комплекс розрахунків.

Аналіз результатів розрахунків показує, що у випадку застосування одного пневмоштовхача для зменшення реалізації аварійних випадків необхідно значно зменшити сили опору, які виникають у процесі розділення ступенів.

Розглянуто результати експериментального відпрацювання системи розділення ступенів на прикладі ракет-носіїв сімейства «Циклон», змодельовано аварійний випадок – нештатне розстикування елементів конструкції ступенів, яке відбулося внаслідок зачепу кришок електроз'єднувачів і призвело до розвороту перехідного відсіку на кут, більший допустимого, описано методику експериментального визначення сил опору, наведено розрахункові значення, отримані на проектній стадії, і порівняно їх з експериментальними даними. У процесі випробувань було визначено складові частини сил опору: зусилля розстикування електроз'єднувачів, зусилля розриву засобів герметизації і сили тертя на напрямних штирях.

Для мінімізації сил опору вперше в практиці проектування ракет-носіїв було запропоновано систему розділення, яка виключає фрикційні сили за рахунок використання альтернативної системи електроз'єднувачів з безконтактною передачею даних і дозволяє зменшити енергетичні втрати й кількість органів надання відносної швидкості системи розділення ступенів, що значно зменшить масу всієї системи.

Проаналізовано сили опору, які виникають за рахунок розриву засобів герметизації, розроблено методику автономного відпрацювання засобів герметизації стику з метою визначення залежності зусилля розриву засобів герметизації від товщини їх шару, розроблено технологію їх нанесення на поверхню стику. Результати випробувань дозволили визначити необхідну товщину засобів герметизації стику й оптимальну технологію їх нанесення. Таким чином, зі зміною технології нанесення засобів герметизації максимальне зусилля опору в процесі розділення ступенів зменшилось у 2,3 раза та не перевищує максимальних і закладених під час проектування.

Результати досліджень дають цінні дані для проектування систем розділення ступенів і розгінних блоків космічних апаратів ракет-носіїв і показують можливість застосування альтернативної системи електроз'єднувачів розділення ступенів.

Ключові слова: пневмоштовхач, безконтактні електроз'єднувачі, сили опору, системи розділення ступенів, мінімальна маса системи розділення, аварійні випадки, динаміка перехідних процесів, ракета-носіїв, характеристики матеріалів, міцність.

One of the primary objectives in designing separation systems for rocket stages is to create a system featuring minimal mass while ensuring the required relative speed of stage separation, achieving minimal thrust difference, and preventing contamination of spacecraft surfaces. Based on the results of resolving an optimization problem, the utilization of one pneumatic pusher for stage separation is one of the optimum scenarios, which will enable a several times lighter mass of the separation system due to the significant reduction of the mass of pipelines, the overall mass of the pusher, and the mass of gas bottles and their fasteners.

The preliminary analysis of the separation process and the possibility of using a single pneumatic pusher for stage separation was performed using a mathematical model in the form of a system of differential equations describing the stage separation process, and through a series of calculations.

The calculation results demonstrate that using a single pneumatic pusher to minimize the risk of an emergency requires a substantial reduction of the resistive forces occurring during stage separation.

The article reviews the results of ground development testing for the stage separation system utilized in the Cyclone launch vehicles. It simulates an emergency when an abnormal detachment of the structural elements of stages occurs due to a meshing of electrical disconnecter covers, resulting in the adapter section rotation by an angle over the allowable value. The article outlines the method for the experimental determination of resistive forces, presents calculated values obtained during the design phase, and compares these values with experimental data. Resistive force components were identified during testing, such as detachment forces for electrical connectors and sealing elements, and friction forces in guiding studs.

For the first time in the practice of launch vehicle design, the authors present a separation system that eliminates resistive forces through the use of an alternative complex of electrical disconnectors, featuring non-contact data transfer and allowing for reduced power losses and fewer elements that produce relative speed for the stage separation system, resulting in a significantly lighter overall mass of the system.

The article analyzes resistive forces induced by the detachment of sealants. It presents a procedure for the autonomous development testing of joint sealants, which identifies the relation between their detachment force and layer thickness. A technique for sealant application to the attachment surface has been developed. The test results enabled determining the required thickness of attachment sealants and the optimum application technique. Therefore, the change in the sealant application technique resulted in a 2.3 times lower maximum resistive force during stage separation, which meets the maximum and design values.

The results of experiments provide meaningful data for the engineers of stage and booster separation systems for spacecraft and launch vehicles. Furthermore, they confirm the feasibility of using alternative electrical disconnectors for stage separation.

Keywords: pneumatic pusher, non-contact electric connector, resistive force, stage separation system, minimum mass of the stage separation system, emergencies, transient dynamics, launch vehicle, materials properties, strength.

Вступ

Процес розділення ступенів, попри його короткоплинність, відіграє важливу роль у польоті ракети-носія. Комплекс вимог до безпеки процесу й параметрів руху ступенів, які розділюються, в широкому діапазоні можливих зовнішніх умов і розкидів характеристик окремих частин ракети-носія, висуває цілий ряд вимог до вибору типу і побудови системи розділення ступенів.

Це завдання є актуальним, оскільки системи розділення з пневмоштовхачами широко використовують на багатьох ракетах-носіях, наприклад на виробках Falcon, Delta [1], [2]. Дані про вирішення завдання оптимізації кількості й параметрів пневмоштовхачів для розділення ступенів не наведено у світових джерелах інформації [3]. Було проведено дослідження з метою мінімізації маси системи розділення ступенів [4] і мінімізації сил опору із забезпеченням потрібних кінематичних параметрів розділення ступеня і розгінного блока. Це свідчить про перспективність використання такого підходу у виробках ДП «КБ «Південне».

Отже, метою цього дослідження є оптимізація конструкції системи розділення виробів сімейства «Циклон».

У статті розглянуто результати експериментального відпрацювання системи розділення ступенів РН «Циклон-4», розглянуто аварійний випадок – нештатне розстикування елементів конструкції ступенів, яке призвело до розвороту перехідного відсіку на кут, більший допустимого, і відбулося внаслідок розриву вушок електроз'єднувачів, описано методику експериментального визначення сил опору, наведено розрахункові значення, отримані на проєктній стадії, і порівняно їх з експериментальними даними, запропоновано альтернативну систему електроз'єднувачів з безконтактною передачею даних, яка дозволить зменшити зусилля розстикування.

Поставлення завдання

Розділення ступеня і розгінного блока КА РКП «Циклон-4» відбувається після проходження густих шарів атмосфери й вимкнення маршового двигуна другого ступеня.

Особливістю процесу розділення є велике заглиблення (3 860 мм) рушійної установки розгінного блока в міжступеневий відсік, а також невеликі зазори між елементами конструкції, які переміщуються відносно одного.

Одним з основних завдань, яке виникає під час проектування системи розділення ступенів, є аналіз сил опору та мінімізування їх і маси елементів системи розділення.

У статті розглянуто результати експериментального відпрацювання системи розділення ступенів РН «Циклон-4» і проаналізовано сили опору.

Для мінімізації сил опору вперше в практиці проектування ракет-носіїв КБ «Південне» було запропоновано систему розділення, яка виключає фрикційні сили за рахунок використання альтернативної системи електроз'єднувачів з безконтактною передачею даних і дозволяє зменшити енергетичні втрати й кількість органів надання відносної швидкості системи розділення ступенів, що значно зменшить масу всієї системи розділення [5].

1. Експериментальні дослідження процесу розділення

1.1. Опис системи й процесу розділення

Як об'єкт випробувань використовували складану одиницю, показану на рис. 1, до її складу входять:

- хвостовий відсік (ХВ);
- перехідний відсік (ПХВ);
- макетні кабелі з відривними електроз'єднувачами системи керування і системи вимірювання, які встановлені групами;
- фрагменти заправно-зливних трубопроводів «О» і «П» зі штатними вузлами розділення;
- пневмоколодки;
- розривні болти (8 шт.);
- ущільнювальні елементи замазки У-20А.

Під час складання виробу перед випробуваннями було проведено заміри «овальності» стикованих відсіків (табл. 1).

Для замірювання переміщення відокремлюваного відсіку на об'єкті випробувань встановлювали датчики відносного шляху Вт-718-08 (рис. 2).

Для замірювання сил опору, які виникають у процесі розділення на випробуваннях, було встановлено датчик сили (сумарної).

Таблиця 1

Геометричні параметри відсіків

Площини стабілізації	Зовнішній діаметр відсіку по обшивці, мм		
	ПХВ 1-го ступеня	ХВ 2-го ступеня	за КД
У пл. I–III	3 007	2 997	3 002
У пл. II–IV	2 995	2 997	3 002
У районі кожухів	2 990	2 997	3 002

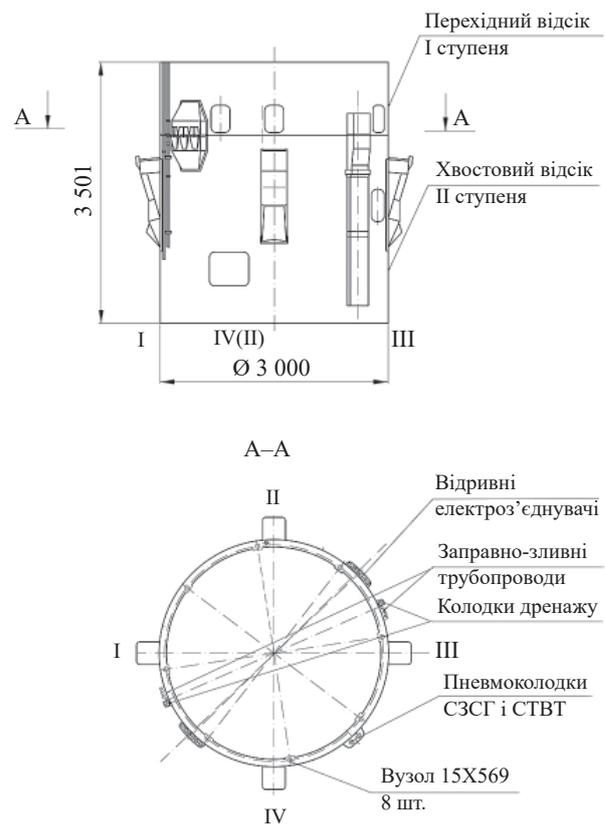


Рис. 1. Схема об'єкта випробувань

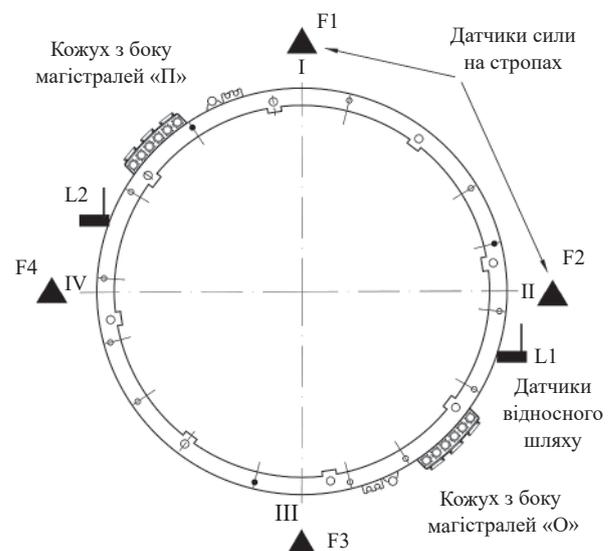


Рис. 2. Схема встановлення датчиків

Умовно процес розділення ступенів можна розбити на три етапи:

- рух ступенів по напрямних штирях після спрацювання розривних болтів і розриву зв'язків;
- рух ступенів під дією зусиль штовхачів після сходу з напрямних штирів;
- рух ступенів з моменту повного висунення штоків штовхача до моменту ввімкнення двигуна розгінного блока.

1.2. Обсяг і методика визначення сил опору під час розділення ступенів

Випробування проводили на складаній одиниці й на окремих елементах конструкції (рис. 3).

Приклад проведення випробувань складаної одиниці наведено на рис. 4.

Випробування проводили в такій послідовності:

- розділення магістралей заправлення і зливання «О» і «П» задіянням детонувальних кумулятивних зарядів;
- перевірка цілісності кіл розривних болтів стику ступенів;
- зовнішній огляд об'єкта випробувань, зовнішній огляд стану ущільнювальної замазки У-20А, фотографування матеріальної частини;
- розділення стику задіянням розривних болтів;
- перевірка кіл задіяння розривних болтів;
- зовнішній огляд об'єкта випробувань, стану ущільнювальної замазки У-20А в стику, фотографування матеріальної частини;
- переміщення вертикально вгору перехідного відсіку за допомогою крана зі швидкістю ~ 30 мм/с;
- зовнішній огляд об'єкта випробувань, стану ущільнювальної замазки У-20А, фотографування матеріальної частини.

У процесі відокремлення перехідного відсіку проводили відеозйомку двома відеокамерами, розміщеними діаметрально протилежно відносно об'єкта випробувань.

Переміщення відсіку реєстрували датчиком відносного шляху.

Випробування на окремих елементах конструкції проводили за такою ж методикою.



Рис. 3. Об'єкт випробувань

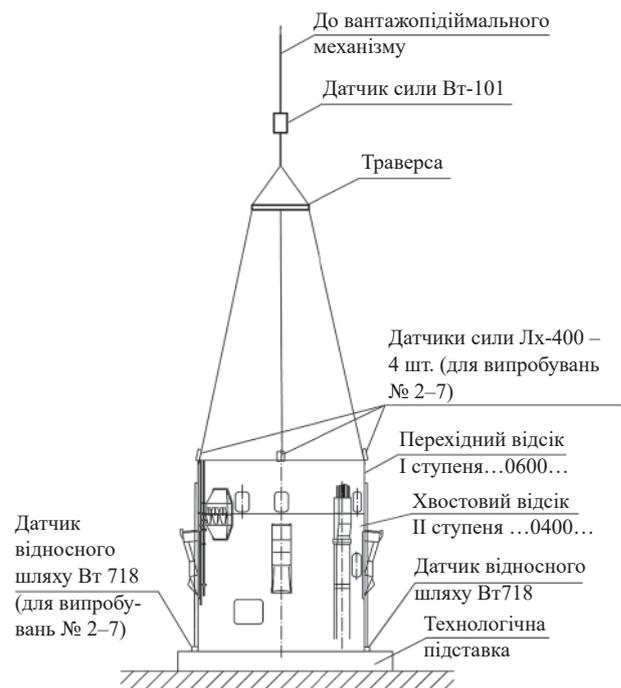


Рис. 4. Схема проведення випробувань

1.3. Результати й аналіз першого етапу випробувань

У процесі проведення випробувань було визначено зусилля розстикування плат електроз'єднувачів, зусилля тертя на напрямних штирях, зусилля розриву засобів герметизації стику (рис. 5).

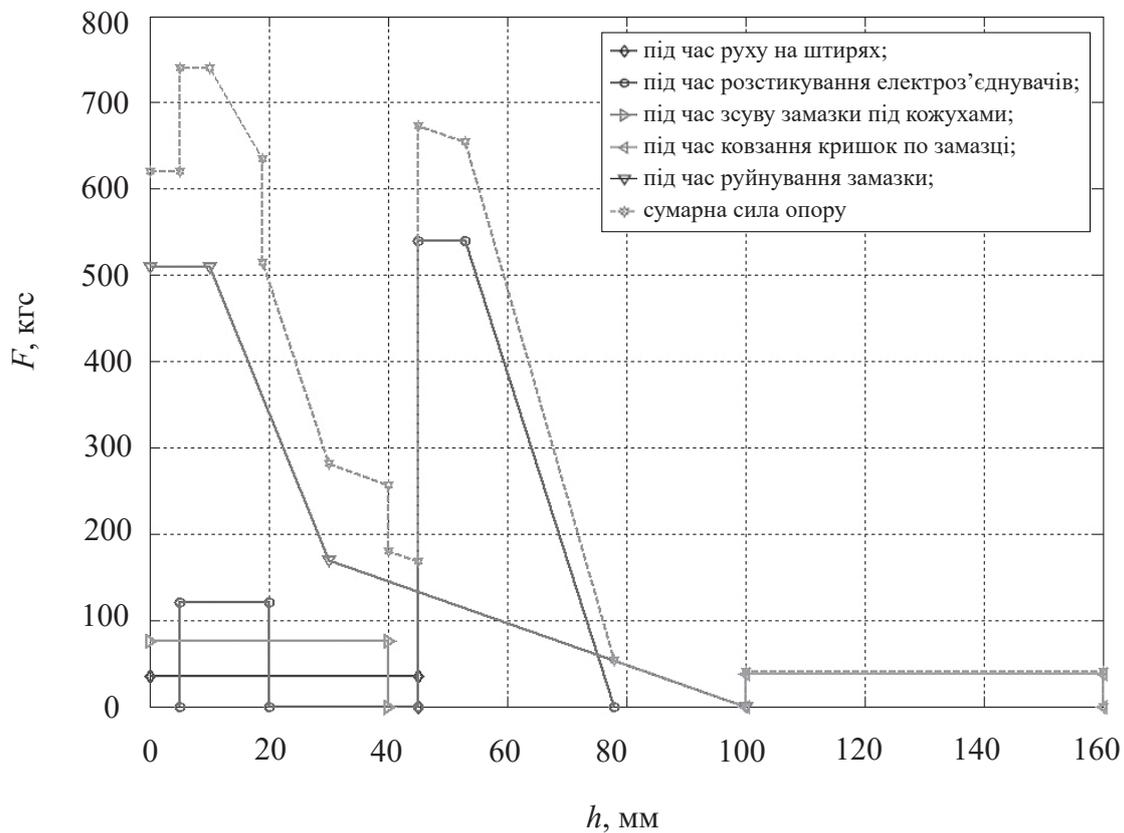


Рис. 5. Діаграма можливих максимальних сил опору під час розділення ступенів за результатами аналізу випробувань

Під час випробування відбулося руйнування вушка кріплення основного троса на корпусі електроз'єднувача ШРА 9, який розміщується між площинами II–III, електроз'єднувач був розстикований прикладенням зусилля до кабелю.

Аналіз роботи конструкції показав, що нештатне розстикування електроз'єднувачів відбулося внаслідок розвороту перехідного відсіку на кут більше допустимого ($>9^\circ$). У штатних умовах кути розвороту ПХВ і ХВ на цій ділянці розділення набагато менше ніж 1° .

У процесі випробувань зафіксовано утримання перехідного відсіку між площинами II–III в районі розміщення кожуха з боку магістралі «О», у результаті чого рух відсіку відбувався з розворотом навколо цього зв'язку.

1.4. Аналіз результатів випробувань

Підтверджено роботоспроможність елементів систем розділення пневмо- і гідромагістралей, піроклапанів системи розділення магістралей заправлення «О» і «П», розрив-

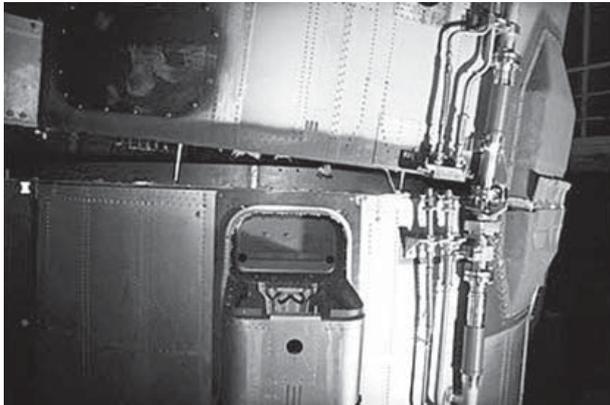
них болтів, підтверджено ефективність захисту конструкції від осколків, які виникають унаслідок їх спрацювання.

За результатами оброблення показників датчиків переміщення і датчиків зусиль, розміщених на стропах системи навантаження, отримано розміщення осей, навколо яких відбувається обертання перехідного відсіку. Аналіз графіків показує, що вісь обертання розміщується у районі $\sim 45^\circ$ від III площини до II, що відповідає розміщенню кожуха (рис. 6, а). Аналіз стану конструкції показує, що саме в цьому місці виявлено зачеп нижнього краю кришки за теплозахисне покриття кожуха (ТЗП) (рис. 6, в).

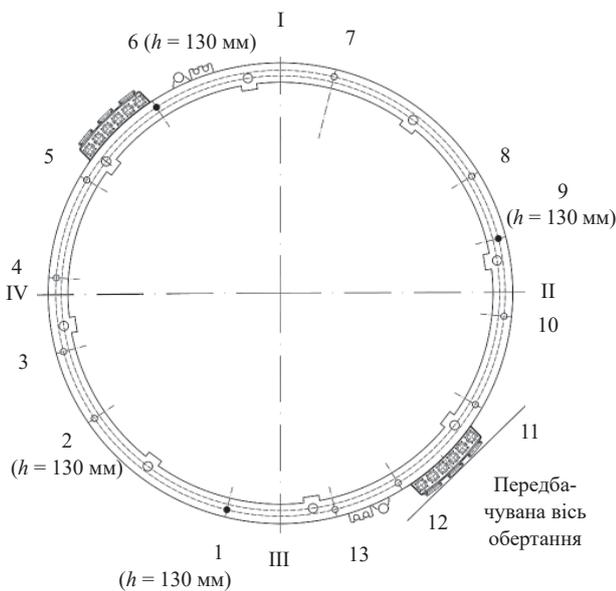
Аналіз відеовимірів (рис. 5), графіків сил опору під час підймання перехідного відсіку і графіків переміщення кожуха між площинами II–III і штирем (рис. 6, в) дозволив виділити декілька характерних ділянок процесу розділення.

1. На цій ділянці відбувається вертикальне переміщення конструкції в районі кожухів між площинами II–III (рис. 6, б). Під час підймання кожуха на висоту ~ 40 – 80 мм кришки нижніми краями зісковзують по

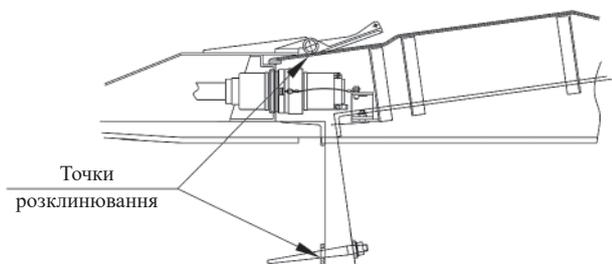
шару ущільнювальної замазки на ТЗП кожуха. На цій же ділянці переміщення під час випробування проходило розстикування електроз'єднувачів.



а



б



в

Рис. 6. Приклад виникнення точок розклинювання:
а – зацеп перехідного відсіку,
б – вісь обертання перехідного відсіку;
в – точки розклинювання

2. Відеовимірювання показують, що на цій ділянці (висота підйому 120–150 мм) кришки верхніми краями зачіплюються за шари замазки на кожухах.

3. Під час розвороту ПХВ ступеня на кут $\sim 3,5^\circ$ штир упирається в край отвору в шпангоуті ПХВ ступеня. Весь подальший рух ПХВ відбувається з контактом по штирю. При цьому відбувається розклинювання між штирями і нижніми краями кришки, що призводить до ще більшого їх врізання в теплозахисне покриття і до значного збільшення сили опору. Розклинювання між штирями і кришками підтверджують сліди на ТЗП від кромek кришок, сліди на штирях від контакту зі шпангоутом і залишковими деформаціями штиря. Подальші рухи відбуваються з деформацією штиря. Інші штирі вільно виходять з відповідних отворів у шпангоуті ПХВ.

4. Припинення підйому ПХВ на команду оператора, початок руху кожуха відносно кожуха (вихід із «зацепу»).

5. Вихід штиря з отвору в шпангоуті ХВ.

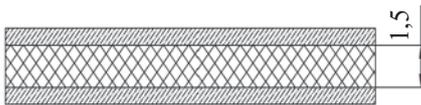
За результатами аналізу випробувань складаної одиниці показано, що сили опору перевищують допустимі у вісім разів, що призвело до нештатного розділення ступенів. Для визначення максимальних сил опору було експериментально визначено сили опору окремих систем.

1.5. Результати й аналіз другого етапу випробувань

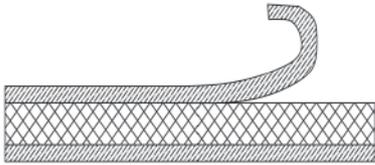
Для оцінювання впливу окремих складаних частин системи розділення на процес розділення і на зусилля опору було проведено випробування, за яких розділення стику ступенів відбувалося тільки з установленими у стику штирями, і випробування, за яких відокремлення ступенів проводили з нанесенням на стик замазки (рис. 7). Аналіз результатів цих випробувань показує, що зусилля опору під час розділення ступенів, коли в стику одні штирі, не перевищило 35 кгс. З нанесенням на стик замазки зусилля опору становило до 500 кгс.

Аналіз відеовимірів, графіків сил опору під час підймання перехідного відсіку і графіків переміщення кожуха між площинами I–IV і II–III, штирів дав змогу виділити декілька ділянок процесу.

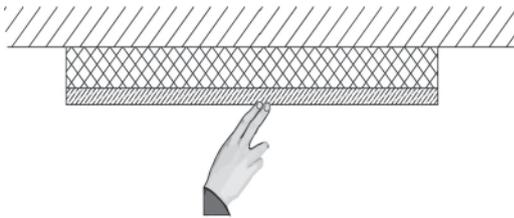
Шар замазки між паперовими підкладками



Підготування до нанесення, склеювання підкладки



Наклеювання замазки на стик ступенів



Відклеювання підкладки, що залишилися

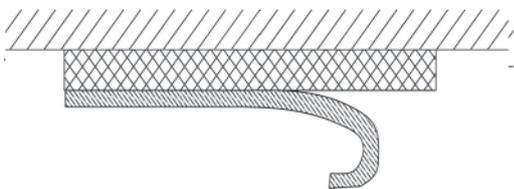


Рис. 7. Нанесення замазки

1. Ділянка виймання чек електроз'єднувачів.
2. Ділянка розстикування електроз'єднувачів між площинами II–III і проходження нижнього краю кришки по шару герметика на кожухах.
3. Ділянка проходження верхнього краю кришок по шару замазки на кожухах.
4. Початок контакту шпангоута ХВ зі штирями (коротким) у районі I площини.
5. Початок контакту шпангоута ХВ з довгим штирем.
6. Відрив утримувального фрагмента замазки в районі встановлення штиря від I площини до II.

Аналіз сил опору показав таке.

Перший пік на графіках визначається зусиллям руйнування замазки (рис. 8). Його значення становило 500 кгс.

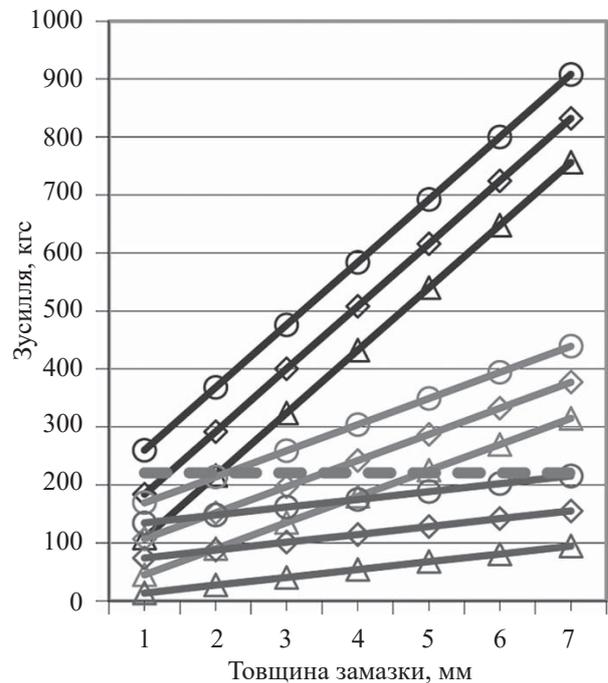


Рис. 8. Зусилля руйнування замазки

Зусилля висмикування чек електроз'єднувачів становило ~ 120 кгс.

Зусилля висмикування електроз'єднувачів становило 520 кгс.

Зусилля опору під час руху на штирях – 35 кгс.

1.6. Методика мінімізації сил опору

Найбільший внесок у силу опору роблять зусилля руйнування замазки та висмикування електроз'єднувачів.

Мінімізації сил опору руйнування замазки

Для пошуку шляхів зменшення сил опору, які виникли під час розділення ступенів, було проведено спеціальні автономні випробування на фрагментах (рис. 8, 9), які показали, що зусилля руйнування замазки залежать від товщини її шару.

Аналіз отриманих даних показує, що для отримання сил руйнування замазки, близьких до прийнятої сили (90 кгс), необхідно розробити технологію її регламентованого нанесення з обмеженням товщини шару (1...1,5) мм.

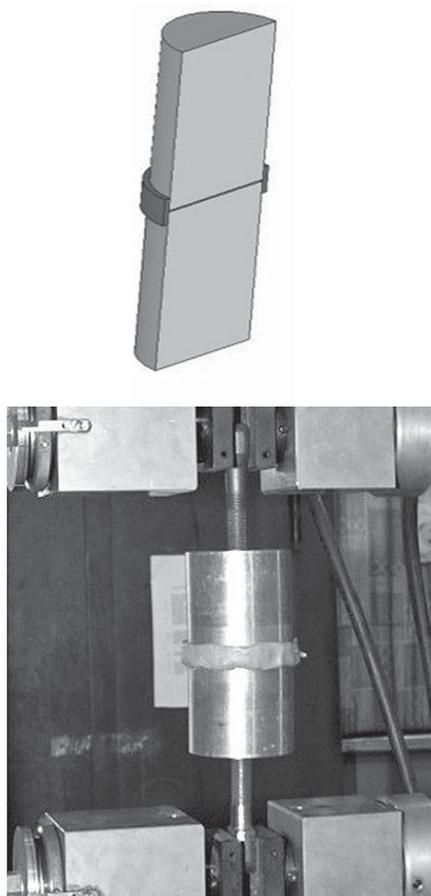


Рис. 9. Приклад експериментального відпрацювання елементів герметизації стику

Для забезпечення виконання таких вимог було розроблено спеціальну технологію, за якою замазку завтовшки $dh = 1,5\text{--}0,5$ мм наносили на стик ступенів за допомогою спеціальних стрічок. Результати статичного оброблення отриманих у процесі автономних випробувань характеристик замазки наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Механічні характеристики замазки

Розкид зусиль F	Напруження розриву замазки $\sigma_{\text{зам}}$, кгс/см ²	Погонне зусилля розриву q , кгс/см
min	0,507	0,051
nom	0,776	0,116
max	1,046	0,157

Для зменшення нестабільності нанесення замазки було розроблено спеціальну тех-

нологію її нанесення і проведено спеціальні випробування з визначення сил її зруйнування. Замазку наносили між двома шарами спеціального паперу, з яким вона мала низьку адгезійну спроможність, потім формували стрічки завширшки 20 мм і завдовжки 125 мм. Товщина шару замазки становила $dh = 1,5\text{--}0,5$ мм.

З нанесенням замазки у вигляді стрічок на стик ступенів, за винятком місць установаження кожухів і жолоба, значення зусилля розриву замазки становитиме до 97 кгс ($F_{\text{min}} = 30$ кгс, $F_{\text{nom}} = 70$ кгс, $F_{\text{max}} = 97$ кгс).

Таким чином, у разі нанесення замазки у вигляді стрічок очікуване максимальне зусилля опору під час розділення ступенів за рахунок розриву замазки в стику шпангоутів становить 97 кгс.

Крім того, автономні випробування замазки показали, що з нагріванням конструкції до температури, яка відповідає максимальній розрахунковій, значення зусилля розриву замазки значно зменшуються.

Отже, аналіз отриманих сил опору показав таке.

Існуюча система технології нанесення замазки на стик ступенів призводить до виникнення значних зусиль її руйнування. Максимальне зусилля розриву замазки становить 510 кгс (із закладеним під час проектування значенням 90 кгс) і з розкидом 44 %, що не допустимо.

У разі зміни технології нанесення замазки на стик ступенів у частині забезпечення максимальної товщини її шару 1,5 мм зусилля її розриву зменшаться до 97 кгс, що близько до закладених під час проектування (рис. 10).

З урахуванням реалізації цієї технології нанесення замазки сили опору під час розділення ступенів не перевищать максимальних, закладених під час проектування 97 кгс (рис. 11).

Мінімізація сил опору розстикування електроз'єднувачів

Мінімізацію сил опору може бути реалізовано за рахунок застосування безконтактних електроз'єднувачів.

Значення очікуваних сил опору під час розділення ступенів дорівнюватиме 0.

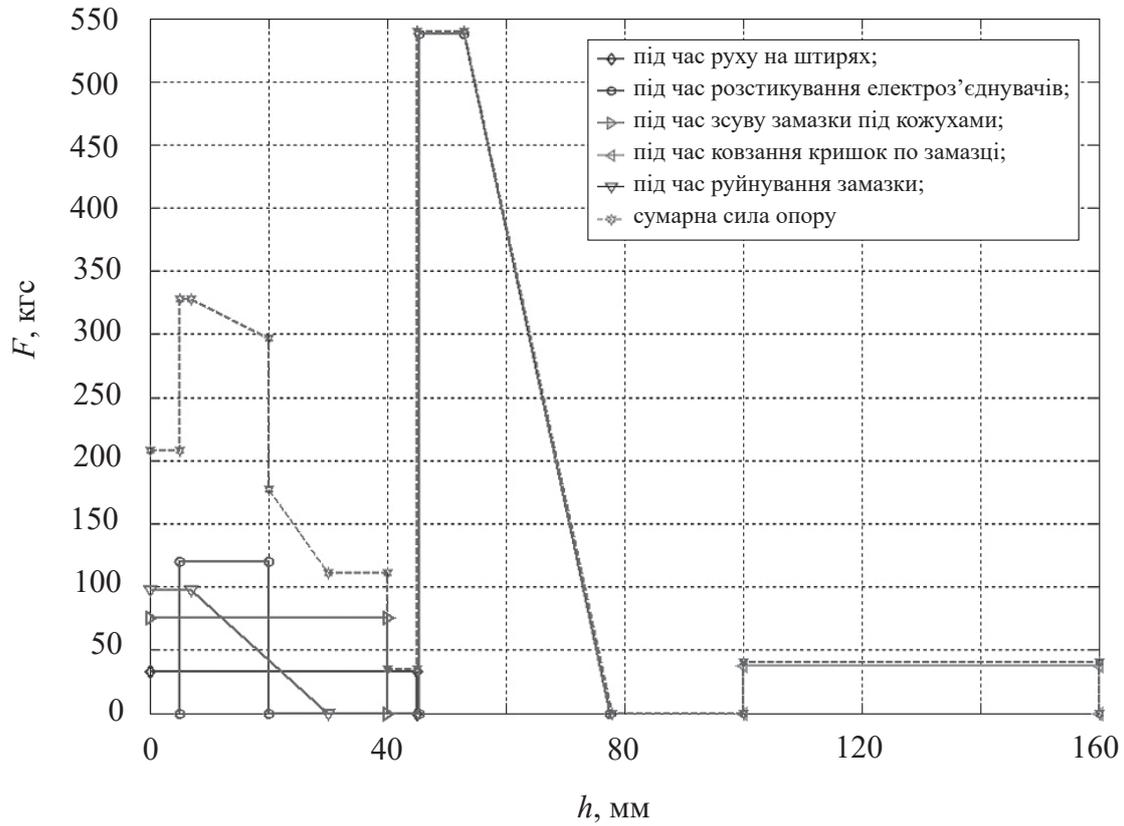


Рис. 10. Діаграма можливих максимальних сил опору під час розділення ступенів для пропонуваного способу нанесення замазки

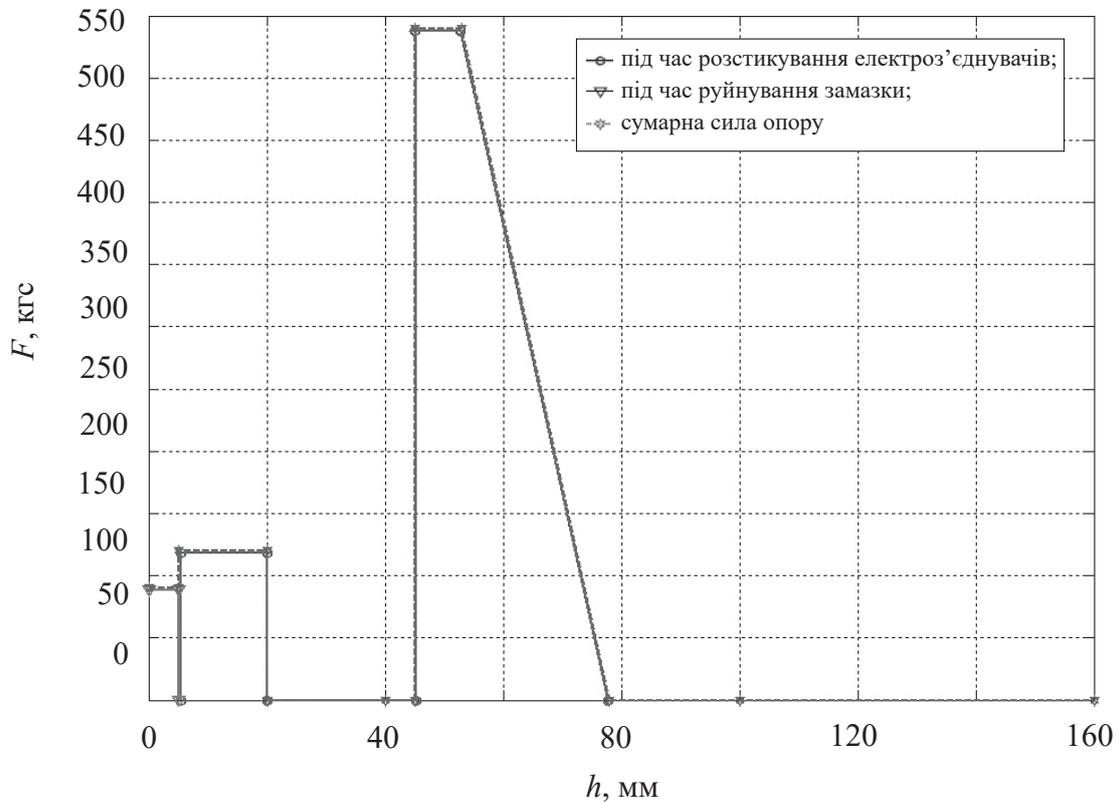


Рис. 11. Діаграма максимальних сил опору під час розстикування електроз'єднувачів у процесі розділення ступенів (закладених під час проєктування)

2. Аналітичне дослідження динаміки розділення ступенів

Для попередньої оцінки процесу розділення було розроблено математичну модель у вигляді системи диференціальних рівнянь, яка описує процес розділення ступенів і проведений комплекс розрахунків.

$$\left\{ \begin{array}{l} m_2 \ddot{x}_2 = P_x - F_{1x} - F_{2x}, \\ m_2 \ddot{y}_2 = F_{1y} - F_{2y}, \\ I_{z2} \ddot{\phi}_3 = \sum M, \\ m_3 \ddot{x}_3 = F_{1x} + F_{2x}, \\ m_3 \ddot{y}_3 = F_{1y} - F_{2y}, \\ I_{z3} \ddot{\phi}_3 = \sum M, \\ \frac{dP_1}{dt} = \frac{k}{V} \left(R \cdot T_1 \cdot \dot{G}_1 - P_1 \frac{dV}{dt} \right), \\ \frac{d\rho_1}{dt} = \frac{1}{V} \left(\dot{G}_1 - \frac{dV}{dt} \rho_1 \right), \\ T_1 = \frac{P_1}{\rho_1 \cdot R}, \\ \dot{G} = \begin{cases} \mu \cdot S \cdot \sqrt{\frac{2gk}{k-1} P_1 \cdot \rho_1 \left(\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{2/k} - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(k+1)/k} \right)}, & P_2 \leq \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \cdot P_1, \\ \mu \cdot S \cdot P_1 \cdot \sqrt{\frac{gk}{R \cdot T_1} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}}, & P_2 > \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \cdot P_1. \end{cases} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dV_1}{dt} = 2S \cdot \frac{dl_1}{dt}, \\ \frac{dl_1}{dt} = f(x_2, y_2, \phi_2, x_3, y_3, \phi_3, \dot{x}_2, \dot{y}_2, \dot{\phi}_2, \dot{x}_3, \dot{y}_3, \dot{\phi}_3), \\ \frac{dP_2}{dt} = \frac{k}{V} \left(R \cdot T_2 \cdot \dot{G}_2 - P_2 \frac{dV}{dt} \right), \\ \frac{d\rho_2}{dt} = \frac{1}{V} \left(\dot{G}_2 - \frac{dV}{dt} \rho_2 \right), \\ T_2 = \frac{P_2}{\rho_2 \cdot R}, \\ \frac{dV_2}{dt} = 2S \cdot \frac{dl_2}{dt}, \\ \frac{dl_2}{dt} = f(x_2, y_2, \phi_2, x_3, y_3, \phi_3, \dot{x}_2, \dot{y}_2, \dot{\phi}_2, \dot{x}_3, \dot{y}_3, \dot{\phi}_3), \\ \frac{dP_{g1}}{dt} = \frac{k}{V} \left(R \cdot T_{g1} \cdot \dot{G}_1 \right), \\ \frac{d\rho_{g1}}{dt} = \frac{-\dot{G}_1}{V}, \\ T_{g1} = \frac{P_{g1}}{\rho_{g1} \cdot R}, \\ \frac{dP_{g2}}{dt} = \frac{k}{V} \left(R \cdot T_{g2} \cdot \dot{G}_2 \right), \\ \frac{d\rho_{g2}}{dt} = \frac{-\dot{G}_2}{V}, \\ T_{g2} = \frac{P_{g2}}{\rho_{g2} \cdot R}. \end{array} \right.$$

Як вихідні дані закладено результати випробувань з визначення сил опору.

До системи звичайних нелінійних диференціальних рівнянь входять диференціальні рівняння, які описують процес руху рухомих частин ступенів, і рівняння, які дають змогу визначити зміну термодинамічних параметрів газу в газовому балоні і пневмоштовхачах.

Перший блок рівнянь містить у собі рівняння динаміки розділення двох абсолютно твердих тіл, які являють собою другий закон Ньютона для поступального й обертового руху [1]. Задачу динаміки розділення ступенів вирішують у площині, у яку закладають всі сили, що діють на ступені в процесі розділення [2], [6].

Другий блок рівнянь використовують для визначення термодинамічних параметрів у газовому балоні і пневмоштовхачах, і він являє собою рівняння Мамонтова.

Рішення системи звичайних диференціальних рівнянь було отримано шляхом численного інтегрування методом Рунге-Кутта.

3. Результати моделювання

Розрахунки було проведено для мінімального тиску заправлення балона 500 кгс/см². У результаті проведених розрахунків було визначено необхідні кінематичні параметри системи розділення і термодинамічні параметри в газовому балоні й пневмоштовхачах. Основні результати розрахунків наведено на рис. 12, показано графіки переміщення, швидкості руху ступенів.

Із графіків видно, що
– мінімальне зусилля штовхача становить до 15 000 кгс;

– мінімальна відносна швидкість ступенів – 3,4 м/с;

– максимальна кутова швидкість – 3,4 м/с;

– значення мінімального зазору між небезпечною точкою розгінного блока КА і міжступеневим відсіком ступеня – 28 мм.

– максимальний час спрацювання штовхачів – 0,2 с;

– максимальний час виходу розгінного блока з міжступеневого відсіку – 1 с.

Аналіз процесу розділення ступенів із застосуванням пневматичної системи розділення показує, що забезпечено необхідну відносну швидкість розділення ступенів і безударність процесу.

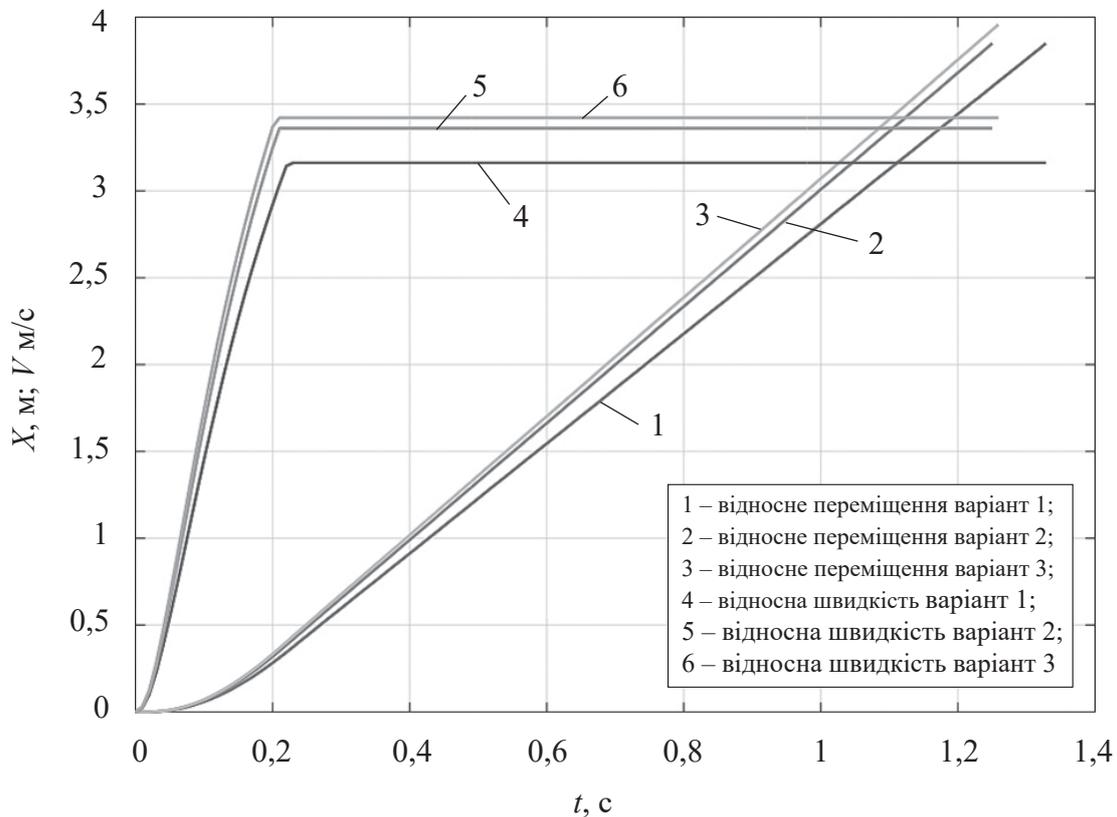


Рис. 12. Відносні швидкості розділення ступенів

Аналогічні методики було використано для проведення розрахунків відокремлення ступок обтічника РН «Циклон-4» й отримано експериментальне підтвердження правильності застосованих розрахункових методик.

За результатами розв'язання оптимізаційної задачі мінімальна маса системи розділення ступенів реалізується за мінімальною кількістю пневмоштовхачів. У випадку РН «Циклон-4М» через великі сили опору, розподілені по периметру відсіку (сили розстикування електроз'єднувачів, сили розстикування замазки), і через велику ймовірність зачепу елементів конструкції мінімальна кількість пневмоштовхачів становить три. У разі використання електроз'єднувачів з безконтактною передачею даних і використання іншого способу герметизації стику сили опору дорівнюватимуть 0. Одну з таких схем було запропоновано на РН Falcon-9, у якій реалізовано розділення з одним пневмоштовхачем, який встановлено між днищем бака і двигуном. Розрахункову масу основних елементів системи розділення ступенів для РН «Циклон-4М» і оптимізованої системи з одним і трьома пневмоштовхачами наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Розрахункова маса системи розділення

Найменування елемента	Маса, кг		
	«Циклон-4М» (8 штовхачів)	Оптимізована система (3 штовхачі)	Оптимізована система (1 штовхач)
Пневмоштовхач	3,80	3,70	12,00
Пневмомагістралі	11,60	2,50	1,00
Кулебалон	5,80	3,20	–
Кронштейн кулебалона	2,45	2,45	–
Клапан зарядний	0,25	0,25	0,25
Сигналізатор тиску	0,36	0,36	0,36
Піроклапан	1,48	1,48	1,48
Кронштейн піроклапана	0,70	0,70	0,70
Кронштейн пневмоштовхача	0,67	0,67	0,67
Фітинг (1 шт.)	0,16	0,16	0,16
Елементи кріплення	4,40	4,40	4,40
Уся система	70,48	27,0	17,80

За результатами досліджень маса оптимізованої системи розділення ступенів з безконтактною передачею даних у 2,5 рази менша від маси системи РН «Циклон-4М».

Наукова новизна

Уперше в розробках ракет-носіїв сімейства «Циклон» розглянуто можливість застосування пневматичної системи з одним пневмоштовхачем для розділення ступеня і розгінного блока космічного апарата ракети-носія, яка дозволяє значно зменшити масу системи розділення, і запропоновано методику мінімізації сил опору.

Висновки

Отже, проведений комплекс експериментально-розрахункових робіт дозволяє створити оптимальну за критерієм мінімальної маси пневматичну систему розділення ступенів з мінімальними силами опору й забезпечує потрібні кінематичні параметри розділення ступеня і розгінного блока, а також виключає забруднення поверхонь космічних апаратів.

Список використаних джерел

1. Hamand M. Yehia, Rigid body dynamics: A Lagrangian Approach. Boston, Birkhauser. 2022. 485 p.
2. Ahmed A. Shabana, Dynamic of Multibody Systems. Cambridge, Cambridge University Press. 2020. 420 p.
3. Бейко І. В., Бублик Б. М., Зінько П. М. Методи й алгоритми розв'язання задач оптимізації. Київ: Вища школа. 1983. 512 с.
4. Удовиченко Д. О. Оптимізація параметрів пневматичної системи розділення ступенів ракети-носія космічного призначення. Вісник ДНУ. 2025. 34 (3). С. 9–17.
5. Линник А. К. Конструювання корпусів рідинних балістичних ракет. Дніпро, Вид-во ДДУ. 1994. 220 с.
6. Joaquim A. Battle, Anna Barjam Condomines, Rigid body dynamics, Cambridge, Cambridge University Press. 2022. 596 p.

Стаття надійшла 10.11.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування
24.11.2025

Дата публікації 12.02.2026