

Канд. техн. наук А. І. Логвиненко, А. О. Макаренко, В. О. Хомяк, А. А. Олесіюк

ВИБІР ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ СИСТЕМИ РОЗДІЛЕННЯ СТУПЕНІВ РКП «ЦИКЛОН-4М»

Розділення відпрацьованих ступенів ракет-носіїв – одне з важливих завдань у ракетній техніці, яке потребує проведення всебічного аналізу різних типів систем, оцінювання їхніх параметрів і конструктивних схем. Наведено основні вимоги, які необхідно враховувати під час проєктування систем розділення: надійне та безпечне розділення, мінімальні втрати енергетики ракети, забезпечення достатньої відстані між ступенями на момент запуску рушійної установки. Надано детальну класифікацію типів систем («холодне», «тепле», «гаряче», «мінометне» розділення) та описано технічну суть з перевагами та недоліками. Розглянуто деякі види «холодного» та «теплого» розділення відпрацьованих ступенів ракет-носіїв, таких як «Дніпро», «Зеніт», Antares, Falcon-9, з різним принципом дії – гальмування відпрацьованим ступенем і розштовхуванням двох ступенів. Наведено короткі характеристики систем на основі тяги газореактивних сопел, гальмування ракетними твердопаливними двигунами, розштовхуванням пружинними та пневматичними штовхачами. На прикладі розроблення систем розділення перспективної ракети космічного призначення «Циклон-4М» запропоновано порядок проєктування систем розділення: визначення потрібної швидкості відділення й енергетики засобів розділення, визначення кількості активних елементів, розрахунок конструктивних та енергетичних параметрів засобів відділення, аналіз отриманих результатів з подальшим вибором системи розділення. Показано використання емпіричних залежностей, які ґрунтовані на досвіді проведення великого обсягу експериментально-теоретичних робіт у ході проєктування, функціонального відпрацювання та льотної експлуатації подібних систем таких ракет-носіїв, як «Циклон», «Дніпро», «Зеніт». За результатами порівняльного аналізу вибрано пневмосистему розділення першого та другого ступенів ракети космічного призначення «Циклон-4М» на основі пневмостовхачів як найбільш ефективну. Наведено її основні характеристики, склад, загальний вигляд і компонування. Викладені матеріали носять методичний характер і можуть бути використані під час розроблення систем розділення ступенів ракет-носіїв, головних обтічників, космічних апаратів і т. п.

Ключові слова: системи розділення ступенів, функціональні елементи відділення, «холодне розділення», «тепле розділення», пневматичні штовхачі, пружинні штовхачі, РДТП, сопла ГРС, РН «Зеніт», РН «Дніпро», РН Falcon 9, РН «Циклон-4М».

Separation of the spent LV stages is one of the important problems of the rocket technology, which requires the comprehensive analysis of different types of systems, evaluation of their parameters and structural layouts. Basic requirements are specified that need to be taken into account when engineering the separation system: reliable and safe separation, minimal losses in payload capability, keeping sufficient distance between the stages at the moment of the propulsion system start. Detailed classification of their types («cold», «warm», «hot», «cold-launched» separation) is given and their technical substance with advantages and drawbacks is described. Certain types of «cold» and «warm» separation of the spent stages of such rockets as Dnepr, Zenit, Antares, Falcon-9 with different operating principle are introduced – braking with the spent stage and pushing apart two stages. Brief characteristics of these systems are given, based on the gas-reactive nozzle thrust, braking with solid-propellant rocket engines, separating with spring or pneumatic pushers. Development of the separation system for the advanced Cyclone-4M ILV is taken as an example and design sequence of stage separation is suggested: determination of the necessary separation velocity and capability of the separation units, determination of the number of active units, calculation of design and energy parameters of the separation units, analysis of the obtained results followed by the selection of the separation system. Use of empirical dependences is shown, based on the great scope of experimental and theoretical activities in the process of design, functional testing and flight operation of similar systems in such rockets as Cyclone, Dnepr and Zenit. According to the comparative analysis results, pneumatic separation system to separate Cyclone-4M Stages 1 and 2 was selected as the most effective one. Its basic characteristics, composition, overall view and configuration are specified. Stated materials are of methodological nature and can be used to engineer the separation systems for LV stages, payload fairings, spacecraft etc.

Key words: separation system, functional units of separation, «cold separation», «warm separation», pneumatic pusher, spring pusher, SPRE, gas-reactive nozzles, Zenit LV, Dnepr LV, Falcon 9 rocket, Cyclone-4M LV.

Вступ

Одним із важливих завдань для багато-ступеневих ракет-носіїв (РН) є відокремлювання відпрацьованих ступенів. Для його вирішення використовують різноманітні схеми систем розділення (СР), які являють собою сукупність елементів, що забезпечують відокремлення відпрацьованих ступенів з урахуванням таких вимог [1, с. 58; 2, с. 341–342; 4, с. 10]:

- надійне та безпечне розділення без зіткнення частин ракети, що розділяються, з гарантованим розривом усіх зв'язків (механічних, електричних, пневматичних і гідравлічних);

- мінімальне початкове збурення на момент початку роботи автомата стабілізації відокремного ступеня;

- мінімальні втрати енергетики ракети за рахунок процесу розділення;

- забезпечення достатньої відстані між ступенями на момент запуску рушійної установки (РУ) наступного ступеня.

Системи розділення ступенів умовно поділяють на чотири типи: «гарячі», «холодні», «теплі» та «мінометні» [1, с. 56–72].

Залежно від конструктивних особливостей і призначення у складі СР виділяють [7, с. 31–32]:

- засоби кріплення та розділення (призначені для з'єднання ступенів і розриву зв'язків між ними в потрібний момент часу);

- функціональні елементи відділення (призначені для забезпечення відносного руху відокремлюваних ступенів – гальмівні РДТП, сопла ГРС, штовхачі та ін.);

- супутні елементи (електророз'єми, гідророз'єми, відокремлювані чохла, шпильки та ін.).

На рис. 1 наведено класифікацію типів систем розділення ступенів РН, принцип дії та їхні функціональні елементи відділення.

Для «гарячої» схеми розділення ступенів відведення наступного ступеня від відпрацьованого забезпечує дія сили тяги його маршового двигуна (МД).

Процес «холодного» розділення ступенів – це відведення відпрацьованого ступеня під дією спеціальних систем гальмування або розштовхування в умовах маршових двигунів, що не працюють. При цьому увімкнення маршового двигуна наступного ступеня

відбувається після відходу відокремлюваної частини на безпечну відстань, щоб унеможливити вплив на неї реактивного струменя.

«Тепле» розділення ступенів полягає в комбінованому використанні спеціальних засобів гальмування відокремлюваної частини разом з дією реактивної сили рульового двигуна (РД) відокремлюваної частини, який попередньо запускається до розірвання зв'язків.

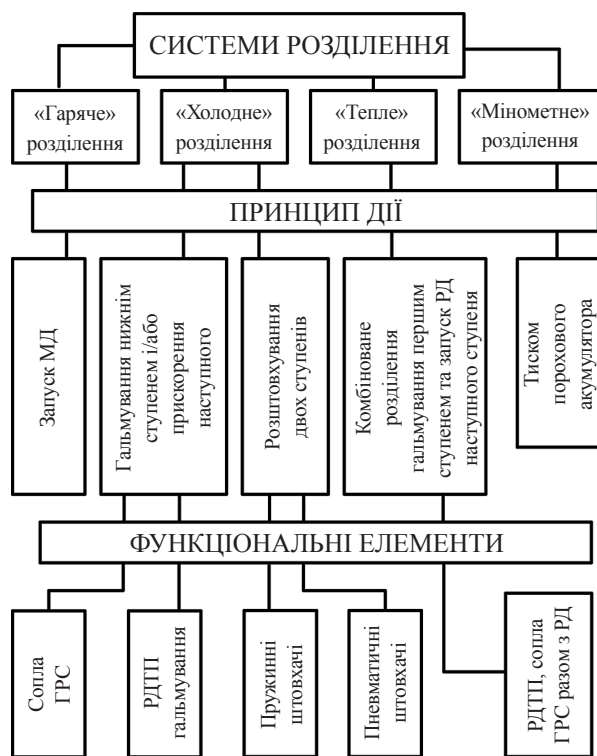


Рис. 1. Типи систем розділення ступенів РН та їхні функціональні елементи

«Мінометне» розділення ступенів забезпечується надлишковим тиском газів від порохового акумулятора тиску, який запускається безпосередньо в міжступеневий об'єм, та за принципом дії нагадує переміщення поршня в циліндрі.

З точки зору мінімізації тривалості процесу розділення та збільшення за рахунок цього енергетики РН найкращими є «гаряче» та «мінометне» розділення ступенів. Але реалізація процесу «гарячого» розділення потребує впровадження спеціальних заходів щодо запобігання руйнуванню та вибуху відокремлюваної частини під час впливу на неї газового струменя МД та захисту безпосередньо відокремлюваної частини. Для «мінометного» розділення, крім питань

міцності, необхідно забезпечити відносно переміщення двох циліндричних оболонок з герметизацією внутрішнього об'єму за рахунок гумових ущільнювачів. Усе це призводить до додаткових масових витрат.

Основною перевагою «холодного» розділення є дія відносно невеликих сил на наступний ступінь, повільно, без значних збурень. Це дозволяє зробити процес розділення безпечнішим і істотно спростити конструкцію. До того ж маса елементів системи розділення залишається на відпрацьованому ступені. Як недоліки відзначимо збільшення часу процесу розділення та втрату швидкості відокремлюваного ступеня за рахунок пізнішого увімкнення його МД.

1. Огляд застосування функціональних елементів відділення систем розділення ступенів

Розглянемо приклади схем розділення, які використовують у розробках РКП таких фірм, як ДП «КБ «Південне» (Україна), Nortrop Grumman (США) та SpaceX (США).

У розробках ракет-носіїв ДП «КБ «Південне» широкі застосування отримали «теплі» та «холодні» схеми розділення ступенів.



Рис. 2. Розміщення РДТП на хвостовому відсіку першого ступеня



Рис. 3. РДТП гальмування

Розділення першого та другого ступенів РН «Циклон-4» та «Зеніт» відбувається задіянням гальмівних РДТП та увімкненням РД другого ступеня. Чотири РДТП розміщені на хвостовому відсіку першого ступеня (рис. 2). Зовнішній вигляд РДТП гальмування подано на рис. 3. Ця система проста та надійна. Але її порівняно висока вартість, необхідність дотримуватися заходів безпеки під час зберігання та пуску РН, великі габарити РДТП та маса, істотна залежність тягових характеристик від температури навколишнього середовища та можливий негативний вплив продуктів згорання РДТП на космічний апарат ускладнює їх застосування.

Розділення другого та третього ступенів РН «Циклон-4» відбувається за класичною «холодною» схемою – тільки за рахунок гальмування РДТП на другому ступені (рис. 4).



Рис. 4. Розміщення РДТП гальмування

Ще одним прикладом «теплої» схеми, успішно реалізованої на ДП «КБ «Південне», але з використанням іншого засобу гальмування, є розділення ступенів РН «Дніпро». Гальмування першого ступеня відбувається за рахунок скидання залишкової енергії газу наддування через спеціальні сопла та запуску РД другого ступеня. Чотири сопла ГРС встановлюють на верхньому днищі бака окиснювача (рис. 5). Ця система надійна, ефективна та в 1,5–2 рази легша за систему розділення за допомогою РДТП. Разом з тим потребує значного експериментального відпрацювання, яке зумовлене залежністю до можливих випадкових розкидів тяги між соплами й імпульсу тяги, які залежать від багатьох факторів.

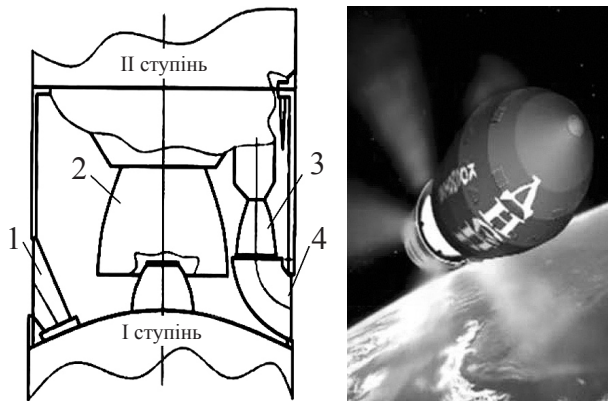


Рис. 5. Газореактивна система розділення ступенів РН «Дніпро»:

1 – сопло ГРС; 2 – сопло маршового двигуна II ступеня; 3 – сопло рульового двигуна II ступеня; 4 – газовідвідний патрубок

Прикладом «холодного» розділення з розштовхуванням ступенів на основі пружинних штовхачів є РН «Антарес», компанії Nortrop Grumman.

Розштовхування ступенів відбувається завдяки енергії восьми пружин стиснення (рис. 6), які попарно встановлені в чотирьох площинах у міжступеновому відсіку (рис. 7) [5].

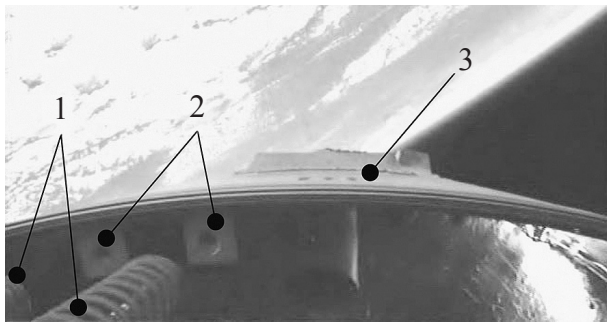


Рис. 6. Пружинні штовхачі та місця їх дії на ступінь: 1 – пружинні штовхачі; 2 – місця їх дії на I ступінь; 3 – I ступінь



Рис. 7. Міжступеневий відсік РН «Антарес»

Система проста у виготовленні та використанні у складі РН, має низьку вартість та високу надійність, а також під час роботи не засмічує середовище навколо КА.

Застосовує «холодну» схему на основі пневматичних штовхачів компанія SpaceX (США). Розділення першого та другого ступенів РН Falcon 9, більш ранніх модифікацій, відбувається за допомогою трьох пневматичних штовхачів, які розміщені в оболонці корпусу міжступеневого відсіку та захищені аеродинамічними обтічниками (рис. 8) [6].



Рис. 8. Пневматичні штовхачі РН Falcon 9

На останніх версіях РН Falcon 9 розділення ступенів відбувається за допомогою центральної пневматичної телескопічної штанги (рис. 9 і 10), яка після спрацьовування пневматичних замків (рис. 11) виштовхує другий ступінь [6].

Як робоче тіло на всіх модифікаціях використовують газ високого тиску, що знаходиться в балонах.



Рис. 9. Центральна телескопічна штанга РН Falcon 9 після спрацьовування



Рис. 10. Центральна телескопічна штанга РН Falcon 9 у складеному вигляді

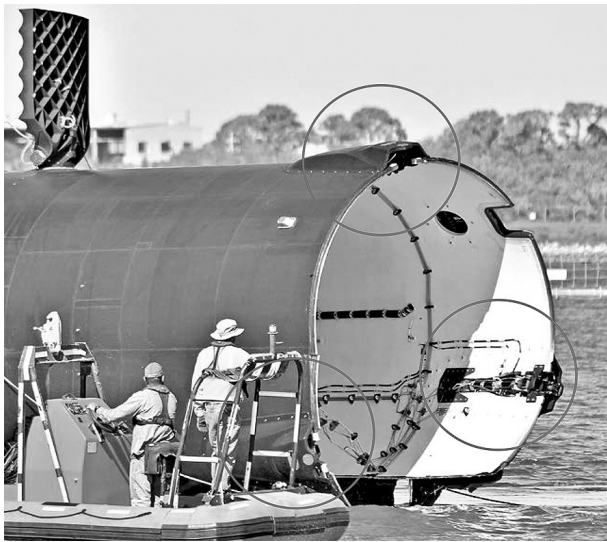


Рис. 11. Пневматичні замки РН Falcon 9

Системи на основі пневмоштовхачів мають найменшу вагу, як і пружинні штовхачі мають високу надійність і зручні в роботі з КА. Недоліками є висока вартість і високі вимоги до точності виготовлення, спеціальні технології використання, які потребують наявності обладнання для заправлення та контролю герметичності.

Ураховуючи вищезазначене, вибір схеми розділення ступенів конкретної РН передбачає проведення комплексного аналізу багатьох варіантів конструктивних схем з урахуванням призначення, особливостей конструкції самої РН, типу палива, ваги відокремлюваних і відокремлених ступенів і т. д.

2. РКП «Циклон-4М»

На ДП «КБ «Південне» створюють перспективну двухступеневу РКП «Циклон-4М». Вона призначена для виведення космічних апаратів (КА) на низькі, середні колові, у тому числі сонячно-синхронні, орбіти. На рис. 12 показано загальне компонування, а в табл. 1 наведено основні характеристики РКП «Циклон-4М» [8].

Таблиця 1

Характеристики РКП «Циклон-4М»

Найменування параметра	I ступінь	II ступінь
Стартова маса без КА, кг	260 276	14 029
Діаметр ступеня (обтічника), м	3,9	3,9 (4,0)
Довжина РКП, м	39,2	
Маса КА, кг	3 300–5 000	

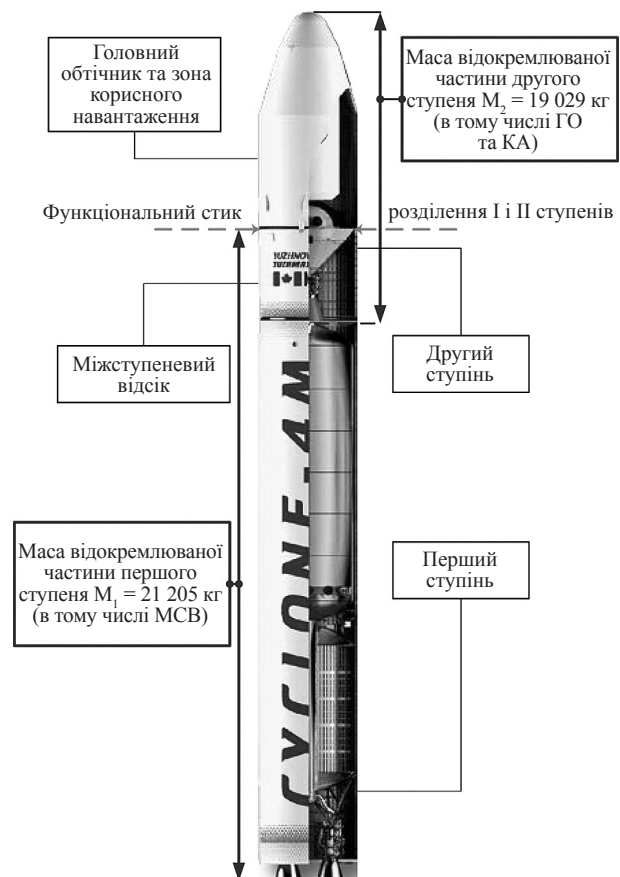


Рис. 12. Компонування РКП «Циклон-4М»

Ураховуючи відсутність рульового двигуна на другому ступені, для подальшого аналізу прийнято схему «холодного» розділення.

Процес «холодного» розділення відбувається таким чином:

- вимкнення РУ відпрацьованого ступеня;
- розрив зв'язків між частинами, що розділяються;
- задіяння функціональних елементів відділення, наприклад, двигунів гальмування або штовхачів та розведення ступенів на потрібну відносну відстань (зазвичай дорівнює 2–3 калібрам);
- увімкнення автомату стабілізації та початок керованого польоту наступного ступеня.

Як елементи відділення розглянемо гальмування за допомогою сопел ГРС і РДТП, та розштовхування пружинними та пневматичними штовхачами.

3. Вибір елементів відділення системи розділення ступенів РКП «Циклон-4М»

На основі узагальнення досвіду розроблення РКП запропоновано такий порядок проектування систем розділення ступенів:

1. Визначення потрібної швидкості й енергетики елементів відділення.
2. Визначення потрібної кількості функціональних елементів відділення (двигунів, сопел, пружин, штовхачів і т. д.).
3. Розрахунок конструктивних та енергетичних параметрів елементів відділення.
4. Аналіз отриманих результатів, вибір елементів відділення, перехід безпосередньо до розроблення системи розділення.

3.1. Визначення потрібної швидкості й енергетики елементів відділення

У ході розділення ступенів відбувається відносний рух двох тіл. Наприклад, вихід другого ступеня із заглиблення в міжступеневому відсіку першого ступеня та відхід ступенів на безпечну відстань один від одного.

Для оцінювання потрібної швидкості розділення необхідно знати тривалість процесу. Зазвичай тривалість процесу обмежується або командою на увімкнення автомату стабілізації та початком керованого польоту другого ступеня, або командою на увімкнення РУ другого ступеня. Таким чином, основними характеристиками процесу розділення є:

- час завершення процесу розділення – τ_k ;
- відносна відстань ($L_{ст}$) між ступенями, які розділяються, на момент τ_k .

Виходячи з цих параметрів, визначають необхідну відносну швидкість розходження ступенів:

$$V_{вш} = \frac{L_{ст}}{\tau_k} \quad (1)$$

Для вибору елементів відділення необхідно визначати потрібні енергетичні характеристики: імпульс або роботу. Імпульс визначають за формулою

$$I = M_1 V_{вш} \quad (2)$$

де I – імпульс; M_1 – маса відокремлюваного ступеня; $V_{вш}$ – відносна швидкість.

Формула для визначення значення роботи має такий вигляд:

$$A = \frac{1}{2} M_{пр} \cdot V_{вш}^2 \quad (3)$$

де A – робота, яку повинні забезпечити засоби відділення; $M_{пр}$ – зведена маса системи двох тіл, яка дорівнює

$$M_{пр} = \frac{M_1 \cdot M_2}{M_1 + M_2} \quad (4)$$

де M_1, M_2 – маса нижнього та верхнього ступенів відповідно (рис. 12).

3.2. Визначення кількості елементів розділення

Зазвичай засоби відділення встановлюють на корпусі відсіку, тому їх кількість повинна бути не менше двох (використання одного елемента призводить до великого збурювального моменту), кількість визначають з умов мінімізації збурень у ході розділення ступенів.

У процесі спрацьовування засобів відділення ступені отримують лінійну та кутову швидкість. При попередньому проектуванні вважається, що ступені не мають ексцентриситету, а засоби відділення розміщують рівномірно по колу в зоні оболонки (корпусу), і кутова швидкість або збурення виникає за рахунок різнотяговості цих засобів. Під поняттям різнотяговість вважають розкид силових характеристик (наприклад, пружина може мати розкид запасеної роботи $\pm 12\%$).

Збурення призводить до обертання ступенів у процесі розходження, внаслідок чого відбувається зменшення зазорів між елементами конструкції, що може призвести до зштовхування.

Вважається, що чим більше засобів відділення, тим менший вплив розкидів їхніх силових характеристик і, відповідно, кутових збурень.

Як приклад на рис. 13 показано напрям дії сил і кутових збурень на ступені під час розділення.

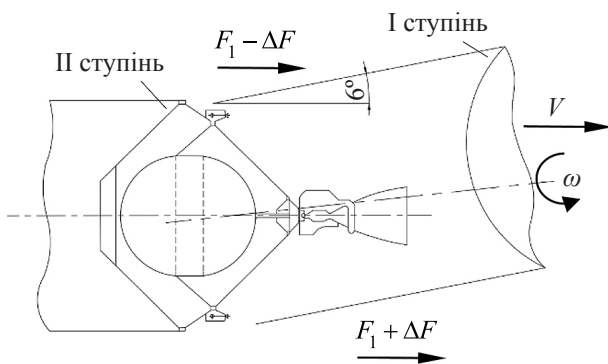


Рис. 13. Напрямок дії сил і кутових збурень під час розділення I і II ступенів

На основі статистичного та ймовірнісного аналізу, а також на основі експериментальних даних побудовано залежність максимально ймовірного збурювального моменту від кількості засобів відділення при збереженні їхнього сумарного зусилля (рис. 14).

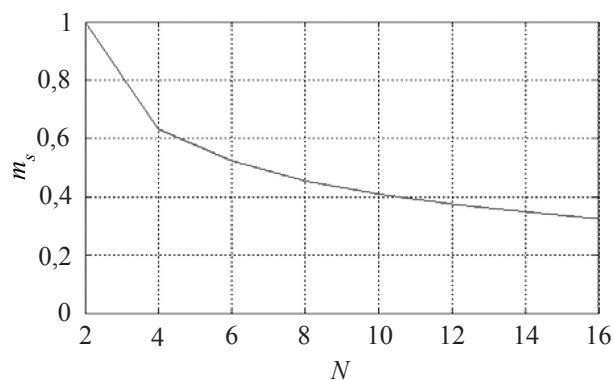


Рис. 14. Залежність максимально ймовірного збурювального моменту від кількості засобів відділення:

$$m_s = \frac{M_n}{M_2} - \text{безрозмірний збурювальний момент}$$

відносно двох засобів відділення; M_n – збурювальний момент від N засобів відділення; M_2 – збурювальний момент від двох засобів відділення

Наприклад, якщо при встановленні двох штовхачів збурювальний момент становить $100 \text{ кг} \cdot \text{м}$, то застосування шести штовхачів, які мають ту саму сумарну силу, дає збурювальний момент у два рази менший, а шістнадцяти – в три рази.

З досвіду розроблення систем розділення на етапі проектування вважається, що для безпечного розходження ступенів, з точки зору відсутності зштовхування елементів конструкції, траєкторія переміщення «небезпечних» точок повинна мати кут не більше 6° .

На основі аналізу параметрів існуючих ступенів ракет, таких як маса, довжина, діаметр, та з урахуванням безпечності відносного розходження ступенів була отримана емпірична залежність допустимого розкиду зусиль засобів відокремлення від габаритів ступенів. Розкид зусиль у випадку використання двох засобів розділення не повинен перевищувати

$$\delta \leq 0,0125 \frac{L}{D}, \quad (5)$$

де δ – розкид зусиль; L – довжина відокремлюваної частини ступеня (для ГРС та РДТП беруть довжину відокремлюваної частини першого ступеня, для штовхачів – довжину відокремлюваної частини другого ступеня); D – діаметр ступеня.

Виходячи з цього, припустимий сумарний розкид зусиль засобів розділення не повинен перевищувати:

– для розділення ступенів гальмуванням РДТП або ГРС – $\delta \leq 0,096$;

– для розділення ступенів розштовхуванням штовхачами – $\delta \leq 0,047$.

З досвіду під час проектування необхідно враховувати такий розкид зусиль засобів розділення:

– для РДТП – $\pm 22\%$ ($\delta = 0,22$);

– для пружинних штовхачів – $\pm 12\%$ ($\delta = 0,12$);

– для пневмостовхачів і ГРС – $\pm 6\%$ ($\delta = 0,06$).

На рис. 15 наведено сумарний еквівалентний розкид засобів розділення залежно від їх кількості з урахуванням безпечності відносного розходження ступенів.

Для кожного типу СР на рис. 15 пунктиром показано гранично допустиме значення розкиду зусиль.

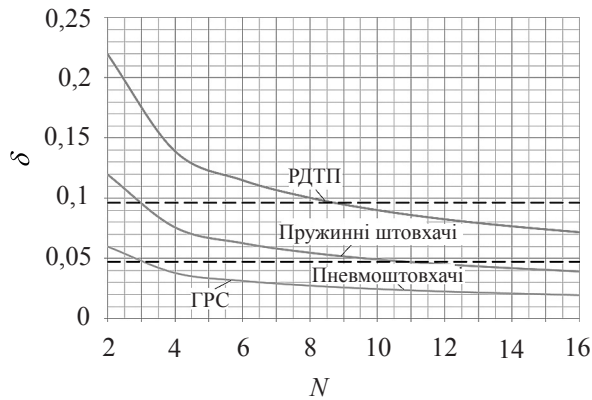


Рис. 15. Сумарний еквівалентний розкид засобів відділення

З рис. 15 видно, що для отримання допустимих збурень необхідно використовувати:

- не менше восьми РДТП;
- не менше десяти пружинних штовхачів;
- не менше чотирьох пневмоштовхачів і сопел ГРС.

3.3. Визначення конструктивних і силових параметрів засобів відділення

Визначимо необхідні характеристики засобів відділення.

Система з використанням РДТП. З урахуванням відносного шляху та часу увімкнення автомату стабілізації ($L_{ст} = 3,85$ м, $\tau_k = 1,56$ с), відносна швидкість повинна становити:

$$V_{вш} = \frac{L_{ст}}{\tau_k} \cdot K = 2,96 \text{ м/с},$$

де K – коефіцієнт, який враховує невизначені фактори впливу під час конструювання (з досвіду беруть $K = 1,2$).

Тоді необхідний сумарний імпульс РДТП гальмування становить

$$I_{\Sigma_{РДТП}} = 6\,144 \text{ кг} \cdot \text{с}.$$

Для маси відокремлюваної частини першого ступеня $M_1 = 21\,205$ кг та з урахуванням необхідної кількості РДТП (вісім штук) імпульс одного РДТП повинен становити $I_1 = 770$ кг·с. З метою економії засобів на розроблення беремо наявний РДТП, який раніше вже використовували на ДП «КБ «Південне», він має імпульс $I = 1\,050 \pm 105$ кг·с. З урахуванням цього сумарна вага системи відділення з РДТП становитиме 240 кгс та

приведе до збільшення габариту першого ступеня на 150 мм (по діаметру).

Система з використанням ГРС. Система розділення за допомогою сопел ГРС за принципом використання аналогічна схемі з РДТП. Основна відмінність, вагома для процесу розходження відокремлюваної частини першого ступеня, полягає в меншому зусиллі, яке створюється, та в довшому за часом перебігу процесу витікання реактивного струменя (тобто зусилля діє протягом усього шляху розділення).

У цьому випадку для визначення параметрів системи розраховуємо рух тіла зі сталим прискоренням. З урахуванням необхідного часу розходження та відносного шляху відокремлюваної частини першого ступеня прискорення становитиме

$$a = \frac{2L_{ст}}{\tau_k^2} \cdot K = 3,8 \text{ м/с}^2. \quad (6)$$

З урахуванням маси відокремлюваної частини першого ступеня сумарна необхідна тяга системи сопел ГРС становитиме $F_{\Sigma} = 7\,940$ кгс.

Встановлюють сопла ГРС на баку пального першого ступеня, оскільки їх використання на баку окиснювача потребує великих масових витрат, а також використання спеціальних технологічних операцій, які пов'язані із забезпеченням роботи піротехнічних засобів у криогенному середовищі.

Як прототип, для проведення розрахунків, прийнято геометричні розміри сопел ГРС, які використовують на РН «Дніпро» [9–10].

Тиск в баку пального на момент відключення РУ першого ступеня становить $1,6$ кгс/см², газ наддування – гелій, при цьому середнє значення тяги одного сопла ГРС з урахуванням дросельної характеристики визначають за формулою [2, с. 356]

$$F_{грс} = \left[k \cdot \sqrt{2 \cdot \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}} \cdot \frac{1}{(k-1)} \left[1 - \left(\frac{P_c}{P} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} \right] \times \\ \times \mu \cdot \psi \cdot f_{кр} + f_{зр} \left(\frac{P_c}{P} \right) \cdot P \cdot \cos(\beta + \Delta\beta), \quad (7)$$

де k – показник адиабати газу в баку; P_c – тиск газу на зрізі сопла; P – тиск газу в баку; μ – коефіцієнт витрати (0,8); ψ – кут

розсіювання; $f_{кр}$ – площа критичного перерізу сопла ($659,7 \text{ см}^2$); $f_{зр}$ – площа зрізу сопла ($923,5 \text{ см}^2$); β – кут встановлення сопла (30°); $\Delta\beta$ – кут відхилу косого зрізу сопла (10°). У результаті тяга одного сопла ГРС дорівнює $F_{грс} = 950 \text{ кгс}$.

Для забезпечення мінімального рівня збурень необхідно вісім сопел ГРС. Сумарна маса системи розділення з ГРС, з урахуванням можливого підсилення днища бака пального, не перевищить 80 кг .

Система на основі пружинних штовхачів.

У випадку використання пружинних штовхачів накладають обмеження повздовжнього перевантаження, яке діє на другий ступінь, та не повинно перевищувати $1,5g$. Таке обмеження зумовлене вимогами до запуску РУ. Під дією великих перевантажень, після закінчення роботи пружин, компоненти палива можуть відійти від нижнього днища за рахунок ефекту пружності конструкції баків.

Визначальними енергетичними характеристиками для системи пружинних штовхачів є: робота штовхачів, початкове зусилля та переміщення.

Для маси ступенів ($M_1 = 21\,205 \text{ кг}$, $M_2 = 19\,029 \text{ кг}$, $M_{пр} = 1\,023 \text{ кг}\cdot\text{с}^2/\text{м}$) і відносної швидкості ($V_{вщ} = 2,96 \text{ м/с}$) необхідне значення сумарної роботи згідно з формулою (3) становить $A_\Sigma = 4\,160 \text{ кг}\cdot\text{м}$. З урахуванням обмежень щодо навантаження сумарне початкове зусилля штовхачів становить $F_{0\Sigma} = 26\,250 \text{ кгс}$.

Як було показано раніше (рис. 15), з точки зору мінімізації збурень необхідно розмістити десять пружинних штовхачів, що має конструктивну складність з урахуванням необхідності встановити вісім точок силового закріплення (розривних болтів). Для подальшого аналізу беремо вісім пружинних штовхачів, при цьому для точніших розрахунків необхідно буде визначити їхню допустимість та передбачити заходи із селективного відбору штовхачів.

Розглядаємо штовхач, пружина якого під час спрацювання розтискається повністю, що забезпечує максимальну енергетику. Початкове зусилля одного штовхача становитиме $F_{ш0} = 3\,280 \text{ кгс}$. Тоді робота штовхача дорівнює

$$A = \frac{1}{2} F_{ш0} \cdot L_{ш}, \quad (8)$$

де $F_{ш0}$ – початкове зусилля; $L_{ш}$ – робочий хід (переміщення) штовхача.

З урахуванням сформованих потреб визначені такі параметри можливих штовхачів (табл. 2).

Таблиця 2

Основні параметри пружинного штовхача

$L_{ш}$, мм	$F_{ш0}$, кгс	d , мм	D , мм	n	$H_{п}$, мм	$H_{к}$, мм	$M_{ш}$, кг
350	2380	32	360	5	260	610	45
700	1190	20	240	9	470	1080	30
1000	830	16	170	23	470	1470	35

$L_{ш}$ – переміщення штовхача; $F_{ш0}$ – початкове зусилля; d – діаметр проволочки; D – діаметр пружини; n – кількість витків; $H_{п}$, $H_{к}$ – габарити штовхача в початковому положенні та після спрацювання; $M_{ш}$ – маса штовхача

Сумарна вага системи з пружинними штовхачами становитиме 400 кгс .

Система на основі пневматичних штовхачів. З урахуванням визначеної раніше необхідної кількості пневмоштовхачів та обмеження на їх розміщення розглянемо два випадки – використання чотирьох та восьми пневмоштовхачів. Аналогічно пружинним штовхачам сумарна робота пневмоштовхачів становить $A_\Sigma = 4\,160 \text{ кг}\cdot\text{м}$, а максимальне початкове зусилля $F_{0\Sigma} = 26\,250 \text{ кгс}$.

Під час проектування пневмосистеми першочергово визначають тиск зарядки балона заданого об'єму та площу поршня штовхача.

У процесі розділення, до початку руху ступенів, відбувається заповнення магістралей і вільного об'єму штовхачів стисненим газом, що призводить до зменшення тиску в системі.

На основі досвіду розроблення (для конкретних конфігурацій) визначено емпіричне співвідношення між тиском заправки балона та початковим тиском у пневмоштовхачі під час спрацювання

$$P_{п} = 0,6 \cdot P_6, \quad (9)$$

де $P_{п}$, P_6 – початковий тиск у пневмоштовхачах і балоні відповідно.

Апробовану методику розрахунку параметрів пневмоштовхача детально розглянуто в [3, с. 107–111]. На рис. 16 наведено зміну за часом тиску газу в балоні та пневмоштовхачі, а на рис. 17 – зміну за часом зусилля одного пневмоштовхача для максимального корисного навантаження (табл. 1).

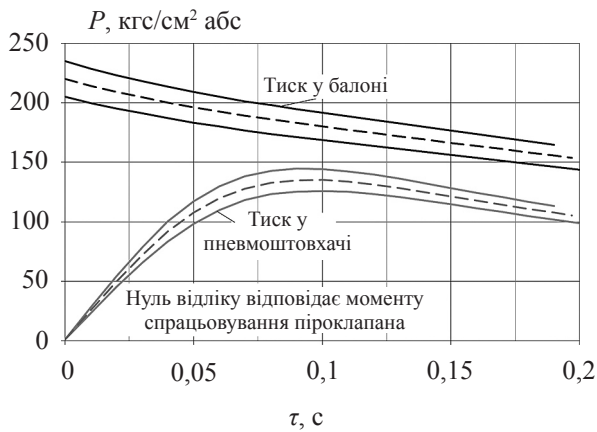


Рис. 16. Зміна за часом тиску газу у балоні та пневмоштовхачі

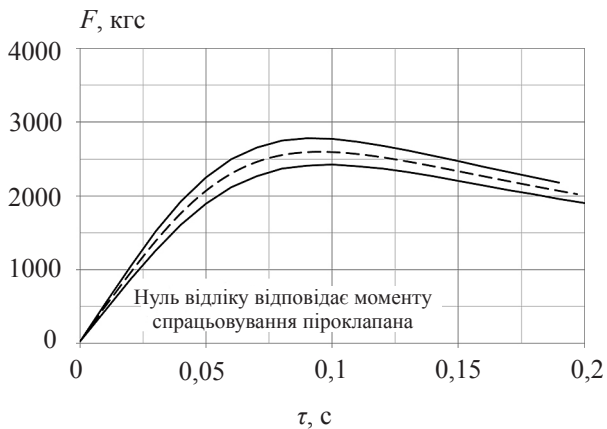


Рис. 17. Зміна за часом зусилля одного пневмоштовхача

У табл. 3 наведено характеристики пневмоштовхачів залежно від їхньої кількості, а також від початкового тиску в балоні.

Таблиця 3

Характеристики пневмоштовхачів

N	$F_{ш0}$, кгс	$P_6 = 220$ кгс/см ²		$P_6 = 150$ кгс/см ²		$P_6 = 100$ кгс/см ²	
		S, см ²	d, мм	S, см ²	d, мм	S, см ²	d, мм
4	6560	50	80	73	96	109	118
8	3280	25	56	36	68	55	83

Виходячи з наявних розробок ДП «КБ «Південне» та мінімальних габаритів для системи розділення візьмемо вісім пневмоштовхачів з робочим ходом штока 350 мм і діаметром поршня 50 мм. Перевагою таких штовхачів є те, що вони пройшли експериментальне відпрацювання в натурних умовах у складі пневмосистеми відділення ступок головного обтічника РН «Циклон-4».

3.4. Аналіз отриманих результатів

У табл. 4 наведено результати порівняльного оцінювання розглянутих варіантів систем розділення ступенів на основі використання РДТП, сопел ГРС, пружинних і пневматичних штовхачів та їхні масові характеристики.

Таблиця 4

Порівняльні характеристики елементів СР

Параметри	Система			
	РДТП	ГРС	Пружинні штовхачі	Пневмоштовхачі
Маса, кг	240	80	400	75
Кількість піроелементів, шт.	8	8	–	1
Імовірний вплив на КА	продукти згорання	продукти згорання	–	–

За даними табл. 4, а також виходячи зі зручності конструювання й експлуатації, для подальшого розроблення для СР ступенів РКП «Циклон-4М» найбільш оптимальним виявився варіант елементів відділення на основі пневматичних штовхачів.

Загальний вигляд пневмоштовхача подано на рис. 18.

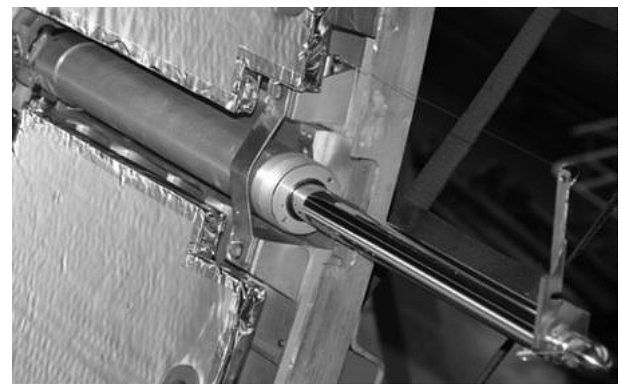


Рис. 18. Пневматичний штовхач

На рис. 19 подано загальний вигляд та компоновку СР на основі пневматичних штовхачів.

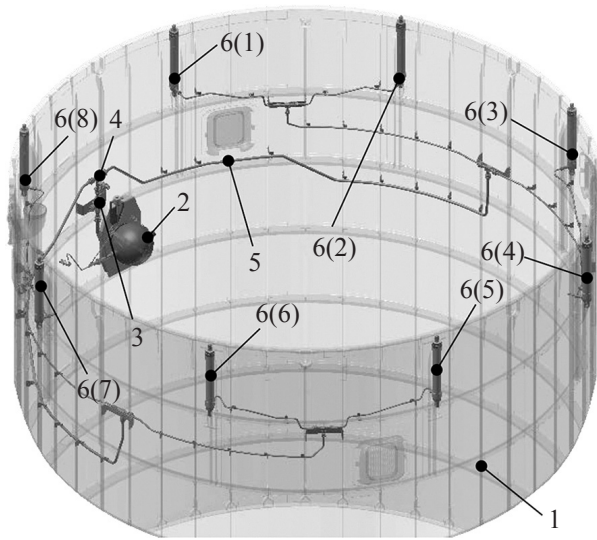


Рис. 19. Пневмосистема розділення ступенів:
1 – міжступеневий відсік; 2 – балон;
3 – піроклапан; 4 – хрестовина; 5 – з’єднувальна
магістраль; 6(1–8) – пневмоштовхач

Висновки

Для системи розділення ступенів перспективної РКП «Циклон-4М» з урахуванням особливостей її компонування, конструкції та технічних вимог проведено вибір найоптимальнішого варіанта елементів відділення системи розділення ступенів. За результатами аналізу відомих схем з використанням РДТП, сопел ГРС, пружинних і пневматичних штовхачів показано переваги та недоліки кожного з варіантів СР. Виходячи з переваг компонування та експлуатації, а також з урахуванням енергетичних показників рекомендовано для впровадження СР на основі пневмоштовхачів.

Список використаної літератури

1. Панкратов Ю. П., Новиков А. В., Татаревский К. Э., Азанов И. Б. Динамика переходных процессов. 2014.
2. Синюков А. М., Морозов Н. И. Конструкция управляемых баллистических ракет. 1969.
3. Кабакова Ж. В., Куда С. А., Логвиненко А. И., Хомяк В. А. Опыт разработки пневмосистемы для отделения головного аэродинамического обтекателя. Космическая техника. Ракетное вооружение. 2017. Вып. 2 (114).
4. Колесников К. С., Козлов В. В., Кокушкин В. В. Динамика разделения ступеней летательных аппаратов. 1977.
5. Antares – Spaceflight Insider: вебсайт. URL: <https://www.Spaceflightinsider.com/missions/iss/ng-18-cygnus-cargo-ship-to-launch-new-science-to-iss/Antares> (дата звернення 30.10.2023).
6. Falcon 9 – pexels: вебсайт. URL: <https://www.pexels.com/Falcon-9> (дата звернення 31.10.2023).
7. Колесников К. С., Кокушкин В. В., Борзых С. В., Панкова Н. В. Расчет и проектирование систем разделения ступеней ракет. 2006.
8. Cyclone-4M – вебсайт URL: <https://www.yuzhnote.com> (дата звернення 31.10.2023).
9. Логвиненко А. И. Создание газореактивных систем отделения и увода отработавших ступеней – новый шаг в РКТ. Космическая техника. Ракетное вооружение, КБЮ, НКАУ, вып. 1, 2001.
10. Логвиненко А. И., Порубаймех В. И., Дуплищева О. М. Современные методы испытаний систем и элементов конструкций летательных аппаратов. Монография. Днепр, КБЮ, 2018.

Стаття надійшла 16.11.2023