

УДК 629.78

С. І. Кушніренко, В. Ю. Шевцов

*Дніпропетровський національний університет імені Олеся Гончара*

## **РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО РОЗРОБКИ КОНСТРУКТИВНО-КОМПОНУВАЛЬНИХ СХЕМ КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ ТА РАКЕТ-НОСІЇВ ДЛЯ ЗАПОБІГАННЯ УТВОРЕННЮ КОСМІЧНОГО СМІТТЯ**

У статті розглянуто сучасний стан проблеми техногенного засмічення космічного простору. Розглянуто напрямки, за якими можливе вирішення даної проблеми. Проаналізовано методи зниження рівня техногенного засмічення навколоземного космічного простору. На основі вітчизняних та міжнародних нормативних документів розроблені рекомендації з вирішення проблеми утворення космічного сміття при проектуванні космічних апаратів (КА) та розробці їхніх конструктивно-компонувальних схем (ККС).

*Ключові слова:* космічне сміття, космічний апарат, космічний об'єкт, конструктивно-компонувальна схема, ракета-носій.

В статье рассмотрено современное состояние проблемы техногенной засоренности космического пространства. Рассмотрены направления, по которым возможно решение данной проблемы. Проанализированы методы снижения уровня техногенного загрязнения околоземного космического пространства. На основании отечественных и международных нормативных документов разработаны рекомендации по решению проблемы образования космического мусора при проектировании космических аппаратов (КА) и разработке их конструктивно-компоновочных схем (ККС).

*Ключевые слова:* космический мусор, космический аппарат, космический объект, конструктивно-компоновочная схема, ракета-носитель.

The current state of the problem of man-made space contamination is considered in this article. It is considered the directions on which the solution of this problem is possible. Methods of decrease a level of man-made pollution of a circumterrestrial space are analysed. On the basis of domestic and international regulatory documents are developed recommendations for solution the problem of creation space debris for designing spacecrafts and for developing its design-layout schemes.

*Keywords:* space debris, spacecraft, space object, design-layout scheme, the rocket.

**Вступ.** Космічне сміття (КС) – це всі штучно створені об'єкти, включаючи їхні фрагменти та елементи, які не виконують заданих цільових функцій та знаходяться на навколоземних орбітах чи прямують до щільних шарів атмосфери Землі [1].

Останнім часом проблема космічного засмічення привертає увагу все більшої чисельності вчених, кожен з яких розглядає її під власним кутом зору. На сьогодні існує багато різних офіційних підходів до вирішення питання боротьби з КС. У 1999 році в Науково-технічному підкомітеті ООН з використання космічного простору в мирних цілях було розроблено «Технічну доповідь про космічне сміття». Після її оприлюднення сформувалась думка про зростаючу загрозу зіткнень космічного сміття з діючими космічними апаратами (КА). У результаті було створено офіційний орган – Міжагентський координаційний комітет по космічному сміттю, який би займався розробкою та випуском нормативно-рекомендаційних документів зі зниження рівня техногенного засмічення навколоземного космічного простору.

За різними даними на навколоземних орбітах знаходиться більше 30000 космічних об'єктів (КО), поперечний розмір яких більше 1 см, а КО з розміром менше 1 см – мільйони. Каталог «Системи контролю космічного простору» (СККП) США нараховує більше 100000 небезпечних КО діаметром більше 5 мм, у каталозі Європейського космічного агентства таких об'єктів близько 45000 [1; 2].

Найбільша кількість небезпечних КО, за якими ведеться спостереження, знаходиться на низьких навколоземних орбітах висотою до 2000 км. Далі, за кількістю об'єктів спостереження, йде геостаціонарна орбіта, висота якої близько 36 тис. км.

На сьогодні політика космічних агентств щодо небезпечних космічних об'єктів тільки починає формуватись, але дослідження стану засміченості навколоземного космічного простору уже викликають зміни у планах та діяльності низки ракетно-космічних фірм. Політика та діяльність у одних випадках мотивується необхідністю захистити космічні апарати, а в інших – не допустити розповсюдження уламків та збільшення кількості небезпечних орбітальних фрагментів.

**Постановка задачі.** Потенційне зростання засміченості навколоземного космічного простору визначається такими основними факторами, як утворення об'єктів, пов'язаних із виконанням програми польоту та польотного завдання, фрагментація супутників та видалення з орбіт об'єктів наприкінці програми польоту.

Дослідження потоків орбітальних фрагментів та можливі способи боротьби з КС відбувається за такими напрямками:

1) заходи попередження утворення КС у процесі виконання польотного завдання;

2) пасивація всіх космічних об'єктів наприкінці програми польоту;

3) зняття чи переведення усіх космічних об'єктів з геостаціонарних орбіт наприкінці програми польоту;

4) спуск космічних об'єктів з низьких навколоземних орбіт після завершення програми польоту, в тому числі зниження висоти орбіти для скорочення терміну існування супутника до 25 років (за вимогами міжнародних стандартів), або ж їх повернення на Землю [1].

Вибір того чи іншого способу боротьби із засміченням космічного простору буде, по суті, компромісом між ефективністю його використання та вартістю реалізації.

**Шляхи вирішення проблеми утворення КС.** На даний час найбільш доцільним способом боротьби із засміченням навколоземного космічного простору є вироблення рекомендацій для розробників космічної техніки з точки зору введення певних обмежень та правил під час розробки принципів та конструктивно-компонувальних схем космічних апаратів та ракет-носіїв. Такий підхід до проблеми космічного сміття регулюється низкою положень та стандартів як українських, так і міжнародних [3–7]. Головним недоліком розглянутих документів є те, що ці документи мають рекомендаційний характер і не обов'язкові для виконання всіма постачальниками космічних послуг. Однак цей недолік можна пояснити тим, що важко врахувати всі вимоги даних нормативних документів під час проектування та експлуатації ракетно-космічної техніки. Тому, розробляючи програми космічних польотів, намагаються використовувати основні з них, хоча досить часто все закінчується лише визначенням імовірності зіткнення КА з космічним сміттям для певної висоти орбіти.

Керуючись принципами щодо зниження рівня засміченості навколоземного космічного простору, можна виділити низку вимог щодо розробки та експлуатації космічної техніки.

До особливостей розробки ККС РН та КА можна віднести:

1. Мініатюризація КА, яка призведе до зниження його маси, що, у свою чергу, викличе зниження кінетичної енергії КО, а отже, зменшення об'єму ділянки простору, забрудненої у результаті зіткнення космічних об'єктів на орбіті. Критерієм для видалення відпрацьованого КА з орбіти може бути показник – добуток маси КА на імовірність його зіткнення з функціонуючим супутником ( $M \cdot P_c$ ) [2]. Відповідно, знижуючи початкову масу КА, ми знижуємо цей показник, а це означає, що об'єкт стає менш небезпечним. З іншого боку, зменшуючи габаритні розміри КА, ми отримуємо можливість збільшити кількість діючих КА в певній орбітальній області (кластерні запуски); при цьому слід пам'ятати, що ймовірність зіткнення космічних об'єктів у будь-якій орбітальній області зростає, приблизно, прямо пропорційно квадрату кількості об'єктів, що знаходяться в даному регіоні [2]. Тому при використанні принципу мініатюризації КА, в першу чергу, необхідно враховувати можливість виконання апаратом поставленого польотного завдання.

2. Збільшення площі поперечного перетину КА для використання ефекту аеродинамічного гальмування на низьких колових та еліптичних орбітах. На низьких навколоземних орбітах (висотою до 500 км) густина земної атмосфери ще досить суттєва, що спричиняє ефект аеродинамічного гальмування. Саме через це необхідно використовувати даний механізм для видалення КА з навколоземного космічного простору. Однак існує положення, за яким термін пасивного балістичного існування КО за рахунок залишкової атмосфери не повинен перевищувати 25 років [3], тому в ескізному проекті слід додатково

проводити розрахунки терміну пасивного балістичного існування та визначити, чи задовольняє КА такі міжнародні вимоги.

3. Розробка лише активних КА. Багато КА розробляються як пасивні космічні системи, що не мають власних виконавчих органів для підтримки висоти орбіти. Використання двигуна КА потребує додаткового запасу палива на борту для здійснення маневрів по сході супутників з орбіти та затоплення їх у щільних шарах атмосфери. Даний підхід можна використовувати також для повернення на Землю відпрацьованих ступенів РН. Слід зауважити, що використання додаткового запасу палива на КА призведе до збільшення його початкової ваги, або ж до зниження маси корисного вантажу, якщо існують обмеження на загальну вагу з боку ракети-носія.

4. Врахування додаткової маси системи зняття КА (СЗКА) на етапі розробки технічного завдання та ескізного проекту – цей принцип впливає з попередніх, адже для розробки та використання системи зняття КА необхідно враховувати відсоток маси цієї системи від загальної маси апарату. Ця система може становити собою двигун з обслуговуючими системами, надувну конструкцію, що використовує ефект аеродинамічного гальмування КА на низьких орбітах, або ж тросову систему, що взаємодіє з електромагнітним полем Землі та використовує накопичені заряди для створення електродинамічної сили для сходження КА з орбіти.

5. Зниження маси СЗКА за рахунок зменшення коефіцієнта тягоозброєння КА ( $\mu_0$ ) та збільшення часу роботи двигуна:

$$\mu_0 = \frac{P_{\text{ДВ}}}{G_{\text{КА}}},$$

де  $P_{\text{ДВ}}$  – тяга двигуна;  $G_{\text{КА}}$  – вага КА.

Ця умова справедлива для використання двигунів малої тяги, зокрема електрореактивних двигунів, що мають невисоке значення номінальної величини тяги двигуна (від  $10^{-6}$  до декількох ньютонів), однак при цьому можуть тривалий час працювати у безперервному режимі (до декількох місяців).

6. Використання орбіт з якомога нижчим перигеєм  $H_{\text{П}} < 500$  км – чим нижче до Землі знаходитиметься точка перигею орбіти, тим менший імпульс необхідний для сходження КА з робочої орбіти чи зміни її параметрів для зменшення терміну балістичного існування до 25 років.

7. Використання орбіт з якомога вищим апогеєм, але при  $H_{\text{А}} < 36\,000$  км чим вищою буде точка апогею орбіти, тим менша імовірність зіткнення космічних апаратів і тим менший запас кінетичної енергії вони матимуть у разі вибуху, адже швидкість КА зменшується зі зростанням висоти орбіти, виходячи з умови:

$$V_{\text{А}} = \sqrt{\frac{2K_3}{R_3 + H_{\text{А}}} + \frac{K_3}{a}},$$

де  $K_3 = 4 \cdot 10^5 \text{ км}^3 / \text{с}^2$  – постійна Землі;  $R_3 = 6371 \text{ км}$  – середній радіус Землі;  $H_A$  – висота точки апогею орбіти над поверхнею Землі;  $a$  – велика піввісь орбіти КА [8].

8. Пасивація балонів, паливних баків РН і КА після закінчення терміну активного існування чи переведення їх на орбіти-могильники [5]. Подібні заходи знайшли широке застосування в наш час і вже зараз проводяться заходи з пасивації залишків палива на українській РН «Дніпро».

9. Знімання зарядів з корпусу КА, як у процесі роботи, так і після закінчення терміну активного існування (запобігання вибуху акумуляторів). КА, перебуваючи в іонізованому просторі, накопичує заряд, який під час взаємодії з акумуляторними батареями може спричинити вибух супутника та розлітання його уламків на значну відстань від епіцентру вибуху, саме через це до розробників висувається вимога щодо пасивації акумуляторних батарей КА.

10. Обмеження утворення КС при штатних операціях – ця рекомендація давно виконується при розробці КА у КБ «Південне». Вона відображається у відмові від елементів, що відкидаються чи відстрілюються в космічний простір під час розкриття сонячних батарей, штанг з науковою апаратурою та роботі двигунів (захисні мембрани, піроелементи, чеки механізмів розкриття та інші елементи поворотних механізмів) [5].

11. Відмова від використання твердопаливних двигунів, які залишають тверді частки, – частки, що викидаються у космос під час роботи твердопаливних двигунів і створюють загрозу для зовнішнього покриття КА, ступенів РН, модулів орбітальних станцій, космонавтів, які працюють у відкритому космосі та оптичних елементів. Хоча характерний розмір цих часток рідко досягає навіть 1 мм, однак, враховуючи їхню кількість під час роботи двигуна та відносну швидкість руху на низьких орбітах, вони можуть становити досить серйозну небезпеку.

12. Використання захисних покриттів для запобігання випаровуванню фарби. Фарба, якою покриваються елементи корпусів КА та ступені РН, може випаровуватись у вакуумі. При цьому утворюються мікрочастки, які становлять таку ж небезпеку, як і викиди з твердопаливних двигунів, тому необхідно використовувати спеціальні захисні покриття для зменшення ефекту випаровування, або ж вибрати фарбу, стійку до впливу космічного середовища.

13. Використання твердих матеріалів (запобігання утворенню кратерів та уламків при зіткненнях з дрібним КС). За високошвидкісних зіткнень КА з дрібним космічним сміттям техногенного чи природного походження існує ймовірність утворення кратерів на поверхні конструкцій. За утворення кратерів, окрім пошкодження поверхні, відбувається утворення мікрочасток дрібного пилу. Використання більш твердих матеріалів та нанесення захисних покриттів зменшить ефект кратеризації, але збільшує загальну масу КА.

14. Зменшення кількості «псевдо» КА під час розробки нових РН та проведення льотних випробувань. Досить часто на орбіту Землі виводиться велика кількість макетів КА (як одиничних КА, так і груп КА). Оскільки усі ці

об'єкти є лише габаритно-ваговими макетами супутників і, як правило, не мають жодних систем керування власним рухом, то в результаті вони перетворюються на космічне сміття техногенного походження, яке залишається на орбіті.

**Висновки.** Розглянуті принципи зменшення рівня техногенного засмічення космічного простору мають рекомендаційний характер. Багато в чому вони можуть суперечити один одному. Системне проектування космічної техніки – це досить складний ітераційний процес, що залежить від багатьох факторів, а тому проєктант повинен враховувати досить багато різних аспектів, що впливають на формування загального вигляду КА та на успішність виконання ним польотного завдання. Тому використання тих чи інших рекомендацій зі зниження рівня техногенного засмічення космічного простору залежатиме, в першу чергу, від економічних чинників, закладених під час розробки технічного завдання на КА.

## БІБЛІОГРАФІЧНІ ПОСИЛАННЯ

1. Техногенное засорение околоземного космического пространства / [Алпатов А.П., Басс В.П., Баулин С.А. и др.]. – Д.: Пороги, 2012. – 378 с.
2. Вениаминов С. С. Космический мусор – угроза человечеству / С. С. Вениаминов, А. М. Червонов. – М.: Ротапринт ИКИ РАН, 2012. – 192 с.
3. Изделия космической техники. Общие требования к космическим средствам по ограничению техногенного засорения околоземного космического пространства: ГОСТ Р 52925-2008. – М.: Стандартинформ, 2008. – 7 с.
4. Изделия космической техники. Общие требования к космическим средствам по ограничению техногенного засорения околоземного космического пространства: ОСТ 134-1023-2000. – ФГУП «ЦНИИ машиностроения», 2000. – 12 с.
5. Правила космічної діяльності в Україні. Обмеження засмічення навколоземного космічного простору при експлуатації космічної техніки: УРКТ-11.03. – Київ: НКАУ, 2004. – 21 с.
6. Space systems – Space debris mitigation requirements: ISO 24113:2011. — British Standard / International Organization for Standardization, 2011. – ISBN 978-058-072-707-8. – 26 s.
7. Space systems – Disposal of satellites operating at geosynchronous altitude: ISO 26872:2010. – British Standard / International Organization for Standardization, 2010. – ISBN 978-058-057-841-0. – 64 s.
8. Шевцов В. Ю. Проектування космічних апаратів: *навч. посібн.* / В. Ю. Шевцов. – Д.: РВВ ДНУ, 2008. – 100 с.

*Надійшла до редколегії 22.11.2013*