УДК 629.78 https://doi.org/10.15407/itm2023.03.110

Д. С. СВОРОБІН

ОГЛЯД МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ВІДВЕДЕННЯ ОБ'ЄКТІВ КОСМІЧНОГО СМІТТЯ З НИЗЬКИХ НАВКОЛОЗЕМНИХ ОРБІТ

Інститут технічної механіки
Національної академії наук України і Державного космічного агентства України,
вул. Лешко-Попеля, 15, м. Дніпро, 49005, Україна; e-mail: svod.itm@gmail.com

Актуальність проблеми космічного сміття в сучасному світі є загально визнаною. Кількість об'єктів космічного сміття в навколоземному просторі стрімко зростає. Метою даної статті є огляд існуючих методів, систем та засобів видалення космічного сміття з низьких навколоземних орбіт. Проведений огляд спрямований на вирішення актуальної проблеми використання космічного простору – проблеми засмічення навколоземних орбіт. Роботи зі створення систем видалення космічного сміття активно ведуться космічними агентствами провідних космічних держав світу. В результаті дослідження встановлено, що у наукових публікаціях значна увага приділяється пасивному та активному методам видалення космічного сміття з навколоземного простору та технічним засобам, що їх реалізують. Відносно нещодавно розпочато вивчення можливості створення систем для відведення об'єктів космічного сміття з використанням комбінованого методу, який передбачає одночасне використання технічних засобів, розроблених на основі пасивних та активних методів. В даній роботі розглянуто комбіновану систему безконтактного видалення космічного сміття з сервісним космічним апаратом, на борту якого встановлено електрореактивні двигуни та аеродинамічний компенсатор у вигляді пластин. Технологія видалення космічного сміття з застосуванням комбінованої системи передбачає направлене зміщення об'єктів космічного сміття з орбіти за рахунок безконтактного впливу на нього іонного потоку. Запропонована комбінована космічна система може бути застосована для відведення космічного сміття з низьких навколоземних орбіт у щільні шари атмосфери з подальшим згорянням його. Комбінований напрям розробки систем відведення об'єктів космічного сміття на даний час є маловивченим, але його втілення передбачає певні переваги у порівнянні із використанням лише пасивних або лише активних систем. Таким чином, розробка комбінованої космічної системи з аеродинамічним компенсатором безконтактної дії на об'єкти космічного сміття є перспективним напрямом, що формує завдання для подальших досліджень.

Ключові слова: *об'єкти космічного сміття, проблема засмічення навколоземного простору, засоби та системи відведення космічного сміття з навколоземних орбіт*.

The importance of the space debris problem in the today's world is generally recognized. The number of space debris objects in near-Earth space is rapidly growing. The goal of this paper is to overview existing methods, systems, and means for space debris removal from low-Earth orbits with the aim to contribute to the solution of a topical problem of outer space utilization: the problem of space debris in near-Earth space. Space debris removal systems are under active development in the leading space countries. The overview showed that in scientific publications a great attention is paid to passive and active methods and means for space debris removal from near-Earth space. Relatively recently, a start was made on studying the feasibility of space debris removal systems using a combined method, which simultaneously uses means developed on the basis of passive and active methods. This paper considers a combined contactless space debris removal system with a service spacecraft equipped with electrojet engines and an aerodynamic compensator in the form of two plates. The combined system implements a directional deorbit of space debris objects by acting thereon with an ion beam. The proposed combined space system may be used to remove space debris from low-Earth orbits to the dense atmosphere followed by its burn-up. The combined line in the development of space debris removal systems is yet to be studied; however, its implementation would offer some advantages over active and passive methods used alone. Because of this, the development of the proposed combined space system with an aerodynamic compensator for contactless space debris removal is a promising line, which poses problems for further studies.

Keywords: *space debris objects, problem of space debris in near-Earth space, systems and means for space debris removal from near-Earth orbits.*

Вступ. Актуальність проблеми космічного сміття в сучасному світі є загально визнаною. Основними джерелами утворення космічного сміття, як правило, є космічні апарати, у яких закінчився строк функціонування, останні ступені ракет-носіїв та їх складові. Кількість об'єктів космічного сміття (ОКС) в навколоземному просторі стрімко зростає. Зокрема це пов'язано з запусками нових супутників, в тому числі мікро- і наносупутників, які часто виводяться як попутне навантаження. Також останнім часом причиною збільшення ОКС стали руйнування супутників на орбіті, зокрема в результаті зіткнення та вибухів. Наприклад, в результаті зіткнення російського супутника «Космос-2251» й американського супутника «Iridium-33» у 2009 році утворилось близько 600 обламків [1].

Космічне сміття несе загрозу не тільки для космічних апаратів, що запускаються та функціонують на робочих орбітах, але є небезпечним й безпосередньо для нашої планети. У вересні 2020 року Forbes [2] опублікував список із 50 об’єктів космічного сміття на низькій навколоземній орбіті, які, за твердженнями аналітиків, становлять найбільшу загрозу для Землі. Список складено на основі аналізу космічного сміття 11 групами вчених з 13 країн, зокрема США, Росії, Японії, Китаю і держав Європи. У [2] вказано країни, які згенерували найбільшу кількість космічного сміття: Росія / СРСР – 5163 об’єкти; США – 4897 об’єктів; Китай – 3717 об’єктів; Франція – 508 об’єктів; Індія – 131 об’єкт; Японія – 115 об’єктів; Європейське космічне агентство (ESA) – 58 об’єктів. Об’єкти оцінювали за ймовірністю зіткнення, а також за масою, висотою і низкою інших чинників. В [2] зауважено, що саме на ці об’єкти варто передусім звернути увагу, борючись із космічним сміттям.

Велика кількість ОКС на орбіті може зрештою призвести до «синдрому Кесслера», за якого зіткнення двох об’єктів у космосі може спричинити вибух та створення десятків уламків, а далі в результаті «цепної реакції» зіткнень можливе лавиноподібне збільшення фрагментів ОКС, внаслідок чого деякі орбіти можуть бути непридатними для використання. Тому, якщо проблему космічного сміття не вирішувати, то дослідження й використання космічного простору найближчим часом стане неможливим.

За даними Національного управління з аеронавтики і дослідження космічного простору США (NASA) на липень 2023 року на навколоземних орбітах знаходилось близько 27148 каталогізованих об’єктів космічного сміття [3]. Динаміку зростання обсягу об’єктів космічного сміття наведено на рисунку 1 [3], на якому позначено: 1 – всі об’єкти; 2 – фрагменти космічного сміття; 3 – космічні апарати; 4 – експлуатаційне космічне сміття, утворене в результаті проведення дослідницьких місій; 5 – ступені ракет-носіїв.

З метою запобігання небезпеки засмічення навколоземного простору Міжагентським координаційним комітетом з космічного сміття (МККС) було вироблено Керівні принципи, згідно з якими рекомендовано обмеження тер-

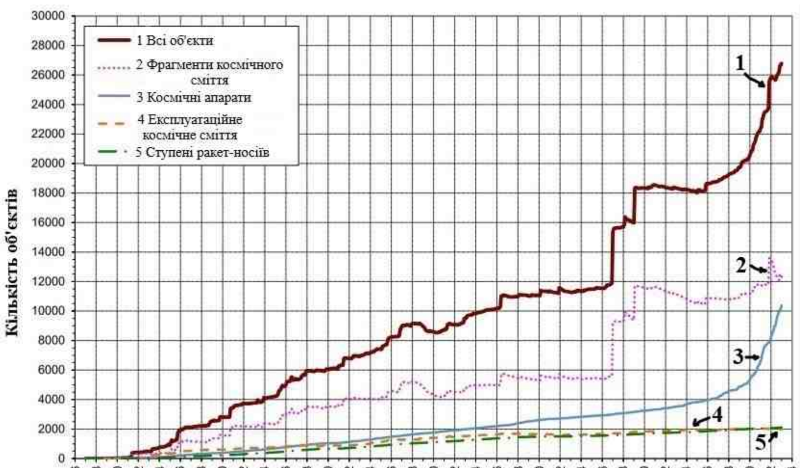

Рис. 1 – Кількість фрагментів космічного сміття на навколоземних орбітах від часу міну існування ОКС на низьких навколоземних орбітах (ННО) не більш, ніж 25 років [4]. Однак, в результаті аналізу еволюції кількості ОКС на навколоземних орбітах [5], проведеного Робочою групою МККС, було виявлено, що кількість ОКС буде щорічно зростати, навіть якщо всі космічні апарати, що запускаються, будуть сходити з орбіти протягом не більше ніж 25 років [6]. Для стабілізації ситуації було запропоновано [5] видаляти з навколоземних орбіт щорічно не менше п'яти ОКС, зокрема за допомогою сервісних космічних апаратів. Також 29 вересня 2022 року Федеральна комісія зі зв'язку (Federal Communications Commission (FCC)) прийняла нове правило, відповідно до якого зменшити вимогу з 25 років до 5 років для супутників із ліцензією в США, а також супутників з інших країн, які прагнуть отримати доступ до ринку США [7]. Таким чином, космічні апарати на орбіті висотою менше 2000 км повинні будуть зійти з орбіти, як тільки це стане застосовним, але не пізніше ніж через 5 років після завершення місії. Ця вимога буде застосовуватися до космічних апаратів, які запущені через два роки після затвердження цього правила.

Постановка задачі. На даний час розробляється значна кількість технічних засобів та методів, що дозволять вирішити проблему відведення з навколоземного простору об'єктів космічного сміття. Більшість таких засобів засновані на пасивному або активному методах відведення. Відносно нещодавно розпочато вивчення можливості створення систем для відведення об'єктів космічного сміття з використанням комбінованого методу, який передбачає одночасне використання технічних засобів, розроблених на основі пасивних та активних методів. Комбінований напрям розробки на даний час є маловивченим, але в майбутньому він може бути перспективним. Основною задачею цього дослідження є огляд сучасного стану розробки різних технічних засобів та методів відведення об'єктів космічного сміття з низьких навколоземних орбіт.

Метою даної статті є огляд існуючих методів, систем та засобів видалення космічного сміття з низьких навколоземних орбіт.

В результаті огляду засобів й систем видалення ОКС з ННО та проведених патентних досліджень виділені основні типи систем видалення, які можна поділити на наступні групи: активні, пасивні та комбіновані.

Роботи зі створення систем видалення космічного сміття активно ведуться космічними агентствами провідних космічних держав світу.

Для видалення ОКС з ННО використовують активні, пасивні та комбіновані системи та засоби.

Активні системи вимагають наявності на борту космічного апарата (КА) необхідної енергії та робочого тіла (палива). Принцип дії таких систем полягає у формуванні імпульсу гальмування, вектор якого спрямований у бік протилежний до головного вектора руху космічного апарата, який видаляється з робочої орбіти. Серед активних систем можуть бути застосовані наступні типи: твердопаливні, рідинні та електрореактивні ракетні двигуни. В разі застосування таких систем передбачається, зокрема, використання власного ракетного двигуна та достатнього запасу палива на КА після закінчення терміну його активної експлуатації. Твердопаливні та рідинні ракетні двигуни можуть застосовуватись для швидкого відведення ОКС з орбіти за короткий проміжок часу, але при цьому потрібна велика кількість робочого тіла (палива). Електрореактивні двигуни можуть бути застосовані в разі тривалого відведення ОКС. Наприклад, у такий спосіб був відведений КА SPOT-1 [8] на орбіту, з якої час досягнення щільних шарів атмосфери складає 16,5 років. Електрореактивні двигуни мають високий питомий імпульс та малу витрату робочого тіла і, отже, мають високу економічність.

В разі, якщо неактивні КА не оснащені власними двигунами або не мають запасу палива можуть бути застосовані космічні апарати-сміттєзбиральники (КАС) та спеціалізовані методи й засоби. Це можуть бути різноманітні контактні та безконтактні системи, засоби та методи для захвату та буксировки ОКС, або зовнішнього дистанційного енергетичного впливу на ОКС: у вигляді полімерної або металічної сітки, гарпуна, концентрованого опромінювання потоком іонізованого газу та ін.

В 2015 році індійськими фахівцями запропонована концепція видалення з орбіти ОКС **SASTROBOT** (Semi Autonomous Satellite Tracking Robot). Концепція SASTROBOT полягає в використанні для очистки навколоземного простору роботизованого КА, який оснащений двома маніпуляторами й запасом ракетних блоків, призначених для жорсткої установки на ОКС, що видаляються з орбіти [9]. Роботизований КА (рис. 2) після наближення до ОКС, що видаляється з орбіти, захоплює його за допомогою маніпулятора захоп-

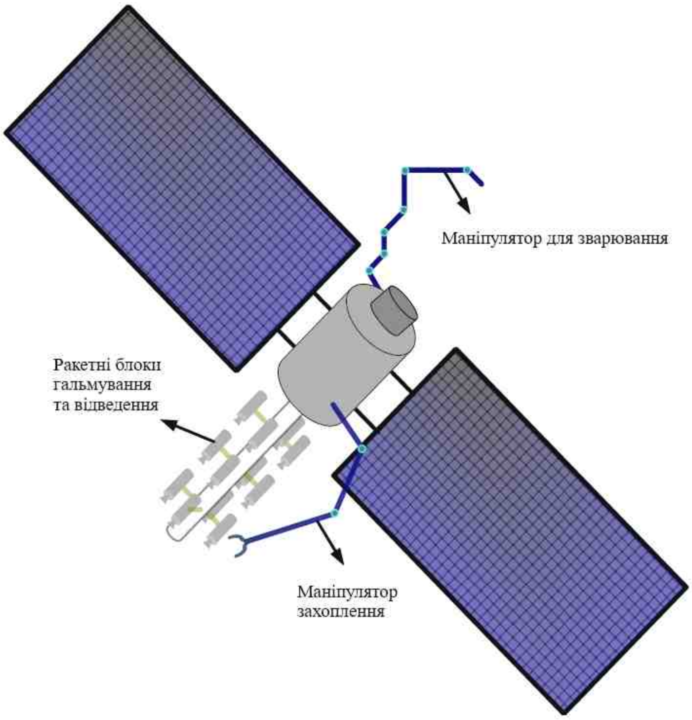

Рис. 2 – Роботизований КА SASTROBOT для видалення ОКС

лення й встановлює за допомогою маніпулятора для зварювання на поверхню ОКС ракетний блок гальмування та відведення. Надалі під керуванням з наземної станції вмикається двигун відведення й ОКС спрямовується у щільні шари атмосфери. Передбачається, що за одну місію роботизований КА здатний видалити з навколоземного простору до 18 неактивних КА й ОКС, а також може використовуватися повторно.

В планах швейцарської компанії **ClearSpace** є контракти на обслуговування активного видалення космічного сміття. Одна із запропонованих місій, ClearSpace One, яка підтримується ESA, буде знаходити, націлюватися та захоплювати 100-кілограмовий верхній ступінь Vega Secondary Payload Adapter (VESPA). Космічний корабель Chaser буде запущений на 500-кілометрову орбіту для введення в експлуатацію та початкових випробувань перед тим, як піднятися на 660-кілометрову орбіту, де він спробує зустрітися та захопити VESPA. ClearSpace One (рис. 3) використовуватиме групу роботизованих рук, щоб захопити верхній ступінь, а потім обидва космічні кораблі разом зійдуть на нижню орбіту для остаточного згорання в атмосфері.

У жовтні 2021 року Космічне агентство Великої Британії доручило ClearSpace розробити техніко-економічне обґрунтування видалення принаймні двох непрацюючих супутників Великої Британії. У цьому дослідженні команда вивчила різні сценарії місії, визначила місію та системні вимоги та вибрала технології, необхідні для реалізації місії. У березні 2022 року ClearSpace успішно завершили цей перший етап дослідження.

Потім було укладено новий контракт на виконання другого етапу цієї місії, який завершиться в 2023 році попереднім аналізом проєкту місії «Очищення середовища LEO з активним видаленням» (CLEAR). Ця місія планує видалити два британські об’єкти, які перебували на орбіті більше 10 років на висоті понад 700 км, з часом виходу з орбіти більше ста років. [10]

Рис. 3 – Проєкт ClearSpace

Місія RemoveDebris перевозила два CubeSat розміром 2U, які були катапультовані з космічного корабля, щоб імітувати космічне сміття та продемонструвати можливості активного сходу з орбіти. Перший CubeSat, відомий як DebrisSat-1, розгорнувся на низькій швидкості від головного космічного корабля, а потім надув повітряну кулю, щоб забезпечити більшу цільову зону. Сітка діаметром 5 м була викинута з основного космічного корабля лише через 144 секунди після розгортання, захопивши CubeSat на відстані ~11 м від материнського корабля. Об’єкт, оповитий сіткою, знову увійшов в атмосферу в березні 2019 року [7]. Місія RemoveDebris також використовувала іншу технологію активного сміття, яка складалася з гарпуна. У цьому сценарії цільова платформа, прикріплена до стріли, була розгорнута з основного космічного корабля. Потім космічний корабель випустив гарпун зі швидкістю 19 м/с і влучив у центр платформи. Як тільки це сталося, 1,5-метрова стріла, яка з’єднувала два об’єкти, зламалася на одному кінці. Проте трос закріпив ціль на місці, уникаючи утворення нових уламків. Це привело до першої демонстрації гарпунної технології в космосі. Гарпунна мішень мала масу 4,3 кг [7].

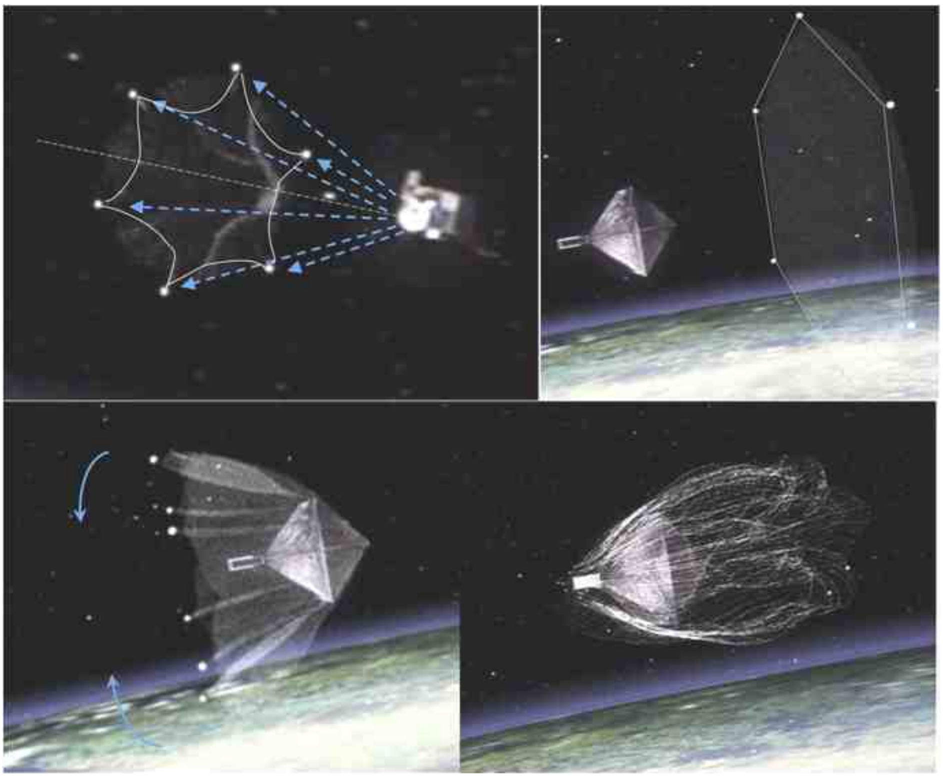

Рис. 4 – Місія RemoveDebris

Пасивні системи відведення ОКС на відміну від активних є безпаливними та використовують природні сили: аеродинамічного гальмування, тиску сонячного світла, електромагнітні. Серед пасивних систем відведення ОКС можуть бути застосовані наступні типи: аеродинамічні системи, сонячні вітрила, тросові системи.

Найбільш перспективними системами відведення КА з ННО висотою (200 – 700) км є аеродинамічні системи відведення (АСВ) [11 – 18] і електродинамічні космічні тросові системи відведення [19 –21]. Недоліком тросових систем є проблематичність розгортання троса на необхідну довжину в кілька кілометрів, в результаті чого значно підвищується ймовірність заплутування, відсутності натягу і пробиття його фрагментами КС.

Сонячні парусні пристрої для приведення в рух КА використовують силу тиску сонячного світла або випромінювання лазера. Сонячні парусні пристрої можуть бути використані для переведення КА на орбіти поховання, де об’єкти космічного сміття не перешкоджатимуть здійсненню майбутніх космічних проєктів.

На відміну від аеродинамічних, сонячні парусні пристрої додатково для збільшення коефіцієнта відображення покриваються відбиваючим матеріалом, наприклад тонким шаром алюмінію. Перевагою сонячного вітрила є їхня висока надійність, недоліками – складні системи розгортання та орієнтації щодо Сонця.

У листопаді 2010 року було запущено КА «FASTSAT», з борту якого у січні 2011 р. було відділено КА «Nanosail-D2», створений Дослідницьким центром Еймса, NASA. Маса КА «Nanosail-D2» 3 кг. Він мав у своєму складі сонячне вітрило каркасного типу площею близько 10 м^2, що розкривається (рис. 5). Відповідно до маси даного КА площа вітрила замала, отже основним завданням експерименту «Nanosail-D2» було зведення його з початкової орбіти [22].

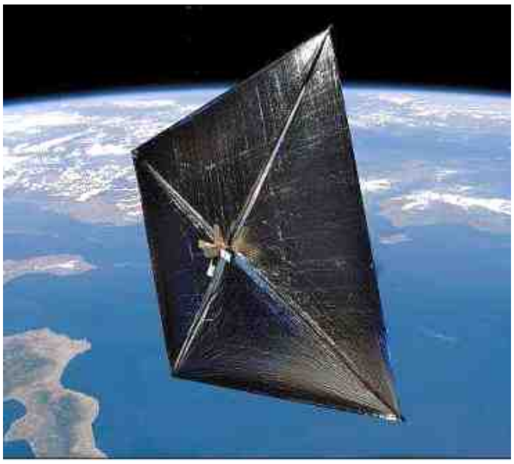

Рис. 5 – КА «NanoSail-D2» в розгорнутому на орбіті вигляді

Апарат призначений для відпрацювання технологій розгортання в космосі дешевих і легких вітрил для відведення КА з ННО після закінчення терміну свого активного існування.

У момент відділення «NanoSail-D» від супутника-носія FASTSAT з'ясувалося, що капсула вітрила застрягла [23]. Спроби операторів звільнити апарат були безуспішними. Однак, 17 січня телеметрія вказала на те, що КА вийшов у відкритий космос. 20 січня «NanoSail-D» отримав команду розкрити своє вітрило, і через кілька секунд розсувні напрямні витягли вітрило площею близько 10 м^2 – квадрат тонкої сріблястої світловідбиваючої плівки. До цього часу сонячне вітрило успішно розкривав тільки один КА – японський зонд IKAROS, який вперше в космічному просторі використовував тиск сонячного світла в якості основного рушія. Космічний апарат «NanoSail-D» теж розгорнув своє вітрило на висоті 650 км над поверхнею Землі. Він став першим в історії космічним апаратом з вітрилом, що виконує політ в атмосфері навколо Землі.

На висотах до ≈ 800 км переважним є використання для відведення з орбіти КА з АСВ. Ці системи прості у виготовленні й експлуатації, не потребують додаткових витрат бортової енергії КА, орієнтації КА, мають відносно невелику масу. Їхні недоліки – зниження ефективності під впливом факторів космічного простору: космічного вакууму, сонячної радіації, атомарного кисню і фрагментів КС.

Принцип дії аеродинамічних системи базується на збільшенні площі перетину ОКС на орбіті, що приводить до збільшення сили його аеродинамічного опору й зменшення часу орбітального існування з подальшим переходом ОКС у щільні шари атмосфери і згоранням.

Вперше у світовій практиці використання сил аеродинамічної дії для пасивної аеродинамічної стабілізації КА в орбітальному польоті було здійснено і відпрацьовано у 1967 році на КА Дніпропетровський супутник – Оптичний

(ДС-МО) «Космічна стріла» (рис. 6) [24]. На КА «Космічна стріла» був використаний аеростабілізатор у вигляді порожнього усіченого конуса, винесеного на деяку відстань від корпусу КА, що дозволило здійснити його стабілізацію за вектором орбітальної швидкості в заданих межах.

Рис. 6 – КА ДС-МО «Космічна стріла»

Реалізований в конструкції проєкту «Космічна стріла» принцип використання сил аеродинамічної взаємодії елементів конструкції супутника з факторами навколишнього космічного простору для забезпечення орієнтації його поздовжньої осі по вектору орбітальної швидкості було застосовано в конструкції КА проєкту Європейського космічного агентства GOCE (Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer) (рис. 7) [25]. Орбітальний політ КА GOCE було здійснено в березні 2009 – листопаді 2013 років. Розміри корпусу КА: довжина ~ 5,3 м, площа поперечного перерізу ~ 1,2 м^2. Застосування на КА GOCE принципу пасивної аеродинамічній стабілізації з використанням в якості «оперення» двох протилежно встановлених панелей сонячних батарей та двох додаткових аеродинамічних стабілізаторів забезпечували мінімальний аеродинамічний опір на номінальній висоті ~ 255 км і до 160 км і ефективну орієнтацію його поздовжньої осі за вектором орбітальної швидкості.

Рис. 7 – КА GOCE на орбіті

Для видалення космічного сміття запропоновано різноманітні контактні та безконтактні системи, засоби та методи: у вигляді надувного або механічного маніпуляторів, полімерної або металічної сітки, гарпуна, концентрованого опромінювання потоком іонізованого газу та ін. Описи різних конструктивних схем космічних апаратів та систем, які реалізують вказані засоби та методи, приведено в ряді джерел інформації: [11, 26 – 34]. Нажаль, більшість зазначених систем видалення космічного сміття з навколоземних орбіт мають різні недоліки, зокрема значну вагу або витрати бортової енергії космічного апарата, складну динаміку усунення ОКС з орбіти, складність реалізації системи дій на ОКС та ін.

Серед перспективних напрямків досліджень велика увага приділяється безконтактним системам, що не передбачають механічного контакту з об'єктом сміття, який може бути некерованим, мати складну форму, здійснювати обертальний рух, тощо.

Концепція «пастух з іонним променем». Найбільш відомою концепцією **безконтактного видалення ОКС** є концепція «пастух з іонним променем» (ПІП). Технічне рішення концепції «пастух з іонним променем» описане в [26], [27], [35]. Концепція ПІП передбачає встановлення на КА двох електрореактивних двигунів (ЕРД): основного і додаткового. Основний ЕРД призначений для передачі «гальмуючого» імпульсу іонним променем на ОКС, а додатковий ЕРД – для підтримки взаємного положення космічного апарата і ОКС.

На рис. 8 показано схематичне зображення системи «космічний пастух з іонним променем» [26], [29].

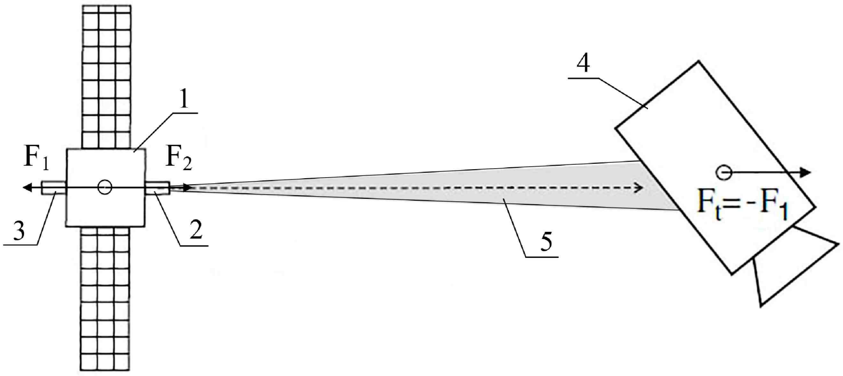

Рис. 8 – Схематичне зображення системи «космічний пастух з іонним променем»

На рис. 8 показано: 1 – КА системи «космічний пастух з іонним променем»; 2 – основний ЕРД, який спрямовує потік іонів у бік ОКС; 3 – додатковий ЕРД для забезпечення нейтралізації впливу тяги основного ЕРД; 4 – об'єкт космічного сміття, який видаляється; 5 – іонний промінь, спрямований у бік ОКС; F_1 – сила, з якою основний ЕРД діє на КА -«космічний пастух з іонним променем»; F_2 – сила опору додаткового ЕРД, що забезпечує нейтралізацію впливу сили тяги основного ЕРД; F_t – сила, яка діє на ОКС за рахунок імпульсу, який несуть іони променя, спрямованого на ОКС. Сила F_t дорівнює за модулем й протилежно спрямована силі F_1, якщо знехтувати імпульсом, пов'язаним з іонами, які розпилює поверхня ОКС, та вважати, що іонний промінь повністю спрямований на ОКС [26], [29].

Технічне рішення ПІП достатньо ефективне та в порівнянні з іншими відомими підходами має, зокрема, такі переваги [29]:

– ефективність відведення космічного сміття; передбачається, що маса КА – «космічний пастух з іонним променем» з паливом значно менша за масу об'єктів космічного сміття, які видаляються;

– низький рівень ризику, пов'язаний з відсутністю прямого контакту з ОКС, який видаляється;

– імпульс, який передає потік іонного променю, не залежить від форми ОКС і його особистого руху;

– можливість повторного використання; можливі декілька операцій з відведення ОКС за допомогою одного КА - «космічний пастух з іонним променем» (КА-ПІП).

Дослідження можливості використання технології «космічний пастух з іонним променем» в [26], [36] показали необхідність керування рухом центра мас КА-ПІП відносно ОКС. Крім того, у дослідженнях [37], [38] було показано, що однією з ключових по відношенню до технології ПІП є вимога зменшення витрат робочого тіла електрореактивних двигунів, що використовуються на КА-ПІП.

Комбінована система видалення космічного сміття.

В роботі [39] для відводу великогабаритних об'єктів космічного сміття з навколоземних орбіт в щільні шари атмосфери Землі запропоновано комбінований метод з використанням реактивної рушійної установки й аеродинамічного вітрила. Рушійна установка забезпечує формування еліптичної орбіти відводу з перигеєм у верхніх шарах атмосфери, а аеродинамічне вітрило – поступове зниження швидкості за рахунок дії сили аеродинамічного опору. Показано, що поєднання активного й пасивного методів дозволяє частково компенсувати недоліки обох методів і реалізувати відведення об'єкта космічного сміття в щільні шари атмосфери в заданий термін з мінімальними витратами.

В роботі [40] запропоновано комбінований метод виведення космічного корабля з орбіти, який заснований на одночасному використанні рухової установки та деорбітного плоского вітрильного елемента, який стабілізується за допомогою магнітних моментів.

В роботі [41] представлено розроблений спосіб комбінованого відведення великогабаритних об'єктів космічного сміття з низьких навколоземних орбіт з використанням електроракетної рушійної установки як активного засобу відведення з орбіти. Розроблена методика відведення з орбіти враховує особливості використання електричної ракетної рушійної установки в порівнянні з маршовою рушійною установкою.

В роботах [42], [43] фахівцями Інституту технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України запропонована система безконтактного видалення космічного сміття з сервісним космічним апаратом (СКА), на борту якого встановлено аеродинамічний компенсатор. Ідея використання аеродинамічного компенсатора полягала у зменшенні витрат робочого тіла одним із передбачених технологією ПІП двох ЕРД КА-пастуха. Дана система є аналогом наведеної вище системи, в якій для видалення ОКС передбачено використання технології «космічний пастух з іонним променем». Системі «космічний пастух з іонним променем» притаманні недоліки, пов'язані з вибором схеми роботи двигуна – джерела потоку іонів, яка потребує обов'язкової компенсації сили тяги, що призводить до нераціональних витрат палива. Зазначені недоліки усунено в комбінованій системі безконтактного видалення об'єктів космічного сміття з навколоземних орбіт, в якій наряду з електрореактивними двигунами передбачено застосування додаткового пристрою – аеродинамічного компенсатора [42], [43], [44].

Технологія видалення космічного сміття з застосуванням системи, яка пропонується в [42], [43], [44], як і системи «космічний пастух з іонним променем», передбачає направлене зміщення ОКС з орбіти за рахунок безконтактного впливу на нього іонного потоку. Потік іонного променя створюється основним ЕРД, встановленим на борту СКА, який знаходиться в безпосередній близькості від ОКС. Потік іонів з основного ЕРД спрямовано на об'єкт космічного сміття. Іони, які досягли поверхні ОКС, проникають в матеріал його поверхні і повністю передають йому свій імпульс. Для компенсації сили реакції на КА – «космічному пастуху з іонним променем» передбачається встановлення додаткового ЕРД, сила тяги якого направлена протилежно силі тяги основного ЕРД.

З метою зменшення витрат робочого тіла додатковим ЕРД в системі передбачено встановлення додаткового пристрою – аеродинамічного компенсатора у вигляді двох пластин [45], [46]. Аеродинамічний компенсатор може доповнювати або замінювати додатковий ЕРД, який використовується для компенсації дії на рух КА з боку основного ЕРД, призначеного для передачі силової дії на ОКС. Завдяки аеродинамічному компенсатору можна при взаємодії СКА з ОКС забезпечувати підтримку між ними необхідної дистанції за рахунок змінювання аеродинамічного опору.

Схематичне зображення системи безконтактного видалення космічного сміття з аеродинамічним компенсатором наведено на рис. 9, де позначено:

1 – СКА; 2 – основний ЕРД; 3 – додатковий ЕРД; 4 – ОКС, який видаляється; 5 – іонний промінь основного ЕРД, спрямований у бік ОКС; 6 – аеродинамічний компенсатор у вигляді двох пластин, кут нахилу яких відносно напрямку руху може змінюватись.

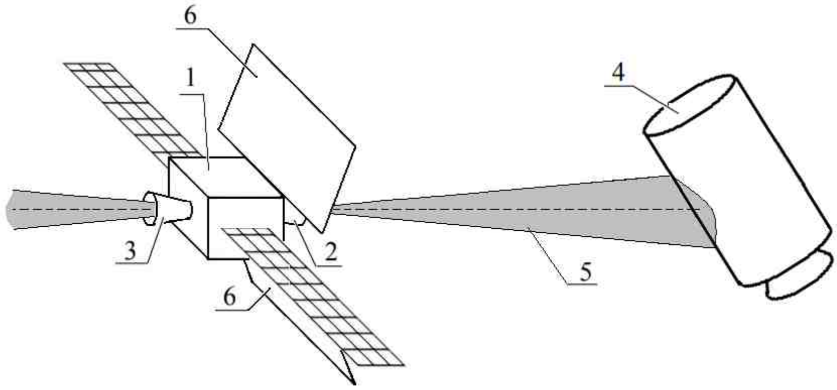

Рис. 9 – Схематичне зображення системи безконтактного видалення космічного сміття з аеродинамічним компенсатором

Використання аеродинамічного компенсатора значно збільшує площу міделя СКА у порівнянні з площею міделя ОКС з урахуванням аеродинамічних збурень, що діють в перпендикулярному площині орбіти напрямку. Це призводить до необхідності оцінювання витрат робочого тіла двигуна системи керування на підтримання необхідного відносного положення СКА та ОКС в цьому напрямку.

В статті [46] було дано оцінку витрат системи керування на компенсацію відхилень вздовж осі Oz, викликаних дією аеродинамічного збурення по цій осі. В [44] дано інтегральну оцінку значення сумарного імпульсу додаткового ЕРД, а в [46] – результати розрахунку сумарних імпульсів додаткового електрореактивного двигуна і двигуна системи керування. Розрахунки проводились для початкової висоти орбіти 640 км та кінцевого значення висоти орбіти 340 км відповідно. Використання аеродинамічного компенсатора дає перевагу в економії витрат імпульсу додаткового ЕРД в $107 \text{ кН} \cdot \text{с}$, що відповідає 3,2 кг робочого тіла – ксенону [46].

Запропонована космічна система з аеродинамічним компенсатором безконтактної дії на ОКС може бути застосована для відведення космічного сміття з ННО у щільні шари атмосфери з подальшим спалюванням його. Також за допомогою СКА запропонованої системи можна буде реалізовувати ще одну задачу, яка виникла у зв'язку з розвитком нової концепції видалення ОКС з робочих орбіт з метою їх подальшої переробки на орбіті при використанні космічних апаратів і платформ орбітального сервісу [47], [48], [49]. А саме, за допомогою СКА з аеродинамічним компенсатором можна буде виконувати переміщення та зосередження ОКС на ННО для подальшої переведення і транспортування їх до відповідних орбіт зберігання для промислової переробки. В цьому разі ОКС стає не сміттям, а одним із видів ресурсу близького космосу. Як зазначено в [47], [48], [49], при вирішенні такої задачі утилізації ОКС на першому етапі необхідно зібрати фрагменти космічного сміття в декілька кластерів, кожен з яких буде розміщено на одній з орбіт утилізації. Далі ОКС будуть транспортуватись до ближнього центру утилізації.

Висновки. В результаті проведеного огляду встановлено, що у наукових публікаціях значна увага приділяється пасивному та активному методам видалення космічного сміття з навколоземного простору та технічним засобам, що їх реалізують. Відносно нещодавно розпочато вивчення можливості створення систем для відведення об'єктів космічного сміття з використанням комбінованого методу, який передбачає одночасне використання технічних засобів, розроблених на основі пасивних та активних методів. Комбінований напрям розробки на даний час є маловивченим. Запропонована комбінована космічна система з аеродинамічним компенсатором безконтактної дії на ОКС може бути застосована для відведення космічного сміття з ННО у щільні шари атмосфери з подальшим спалюванням його. Також за допомогою СКА запропонованої системи можна буде реалізовувати ще одну задачу – виконувати переміщення та зосередження ОКС на ННО для подальшого переведення і транспортування їх до відповідних орбіт зберігання для промислової переробки, що є перспективним напрямом індустріалізації космосу. Таким чином, розробка комбінованої космічної системи безконтактної дії на ОКС з використанням аеродинамічного компенсатора є перспективним напрямом, що формує завдання для подальших досліджень.

1. The Orbital Debris Quarterly News. NASAJSC Houston. 2009. Vol. 13, № 2. 10 p.
2. O'Callaghan J. These are the 50 most dangerous objects orbiting Earth right now. URL: https://www.forbes.com/sites/jonathanocallaghan/2020/09/10/experts-reveal-the-50-most-dangerous-pieces-of-space-junk-orbiting-earth-right-now/?sh=9bc74b97c216 (Last accessed: 31.08.2023).
3. The Orbital Debris Quarterly News. NASAJSC Houston. 2023. Vol. 27, № 3. 14 p.

4. IADC Space debris mitigation guidelines. IADC-2002-01. Revision 1. Issued by Steering Group and Working Group 4. 2007. September. 10 p.
5. *Virgili B.B, Krag H.* Active debris removal for LEO missions. Proceedings of 31st IADC meeting, Darmstadt, Germany, 18th of April, 2013. 7 p.
6. *Crowther R, Krag H.* The inter-agency space debris coordination committee. URL: https://www.icao.int/Meetings/SPACE2016/Presentations/2%20-%20H.%20Krag%20-%20IADC.pdf (Last accessed: 31.08.2023).
7. State-of-the-Art Small Spacecraft Technology. Small Spacecraft Systems Virtual Institute. Ames Research Center, Moffett Field, California, 2023. 366 p. URL: https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/2022_soa_full_0.pdf (Last accessed: 31.08.2023).
8. *Alby F.* SPOT-1 End of life disposal maneuvers. Advances in Space Research. 2004. № 35. P. 1335–1342. https://doi.org/10.1016/j.asr.2004.12.013
9. *Srikrishnan S., Dr. Dash P. K., Dr. Nadaraja Pillai S., Arunvinthan S.* An Approach for Space Debris cleaning using space based Robots. International Journal of Engineering Research And Management (IJERM), 2015. Vol. 2. Iss. 6. P. 51–54.
10. ClearSpace secures a major UK contract to help clean up space. Septmeber 26, 2022. URL: https://clearspace.today/clearspace-secures-a-major-uk-contract-to-help-clean-up-space/ (Last accessed: 31.08.2023).
11. *Палий А. С., Скорик А. Д.* Анализ возможности использования аэродинамических систем для увода модульных крупногабаритных космических объектов с низких околоземных орбит. Техническая механика. 2014. № 2. С. 43–51.
12. *Алпатов А. П., Палий А. С., Скорик А. Д.* Аэродинамические системы увода космических объектов. Техническая механика. 2015. № 4. С. 126–138.
13. *Алпатов А. П., Палій О. С., Скорік О. Д.* Розробка конструктивної схеми та вибір проєктних параметрів аеродинамічної системи відведення з орбіти розгінних ступенів ракет-носіїв. Наука та інновації. 2017. Т. 13, № 4. С. 33–45. https://doi.org/10.15407/scine13.04.029
14. *Палій О. С., Алпатов А. П., Скорік О. Д., Авдєєв А. М., Баранов Є. Ю.* Аеродинамічна система усунення космічних об’єктів з навколоземних орбіт: пат. 109194, МПК B 64 G 1/62; a201312759; заявл. 01.11.13; опубл. 27.07.2015, Бюл. № 14. 12 с.
15. *Палій О. С., Алпатов А. П, Скорік О. Д.* Спосіб усунення космічних об’єктів з навколоземних орбіт та система для його здійснення: пат. 109318 Украина: МПК B 64 G 1/62, № 109318; a20131326; заявл. 14.11.13; опубл. 10.08.2015, Бюл. № 15. 11 с.
16. *Палій О. С., Алпатов А. П., Пилипенко О. В., Скорік О. Д.* Спосіб зменшення терміну балістичного існування космічних об’єктів на навколоземних орбітах і космічний апарат для його здійснення: пат. 113747 Украина: МПК B 64 G 1/62; a201407652; заявл. 07.07.2014; опубл. 10.03.2017, Бюл. № 5. 11 с.
17. *Rasse B., Damilano P., Dupuy C.* Satellite inflatable deorbiting equipment for LEO spacecrafts. Journal of Space Safety Engineering. 2014. Vol. 1, No. 2. P. 75–83. https://doi.org/10.1016/S2468-8967(16)30084-2
18. *Bernardi F., Vignali G.* Sailing System for Cubesat Deorbiting. University of Rome, Italy. 2016. URL: http://www.unisec-global.org/ddc/pdf/1st/01_FedericoSailing_abst.pdf (Last accessed: 31.08.2023).
19. *Мищенко А. В.* К определению длины троса экспериментальной электродинамической системы. Технічна механіка. 2017. № 4. С. 55–63. https://doi.org/10.15407/itm2017.04.055
20. *Мищенко А. В., Пироженко О. В.* Малая экспериментальная электродинамическая космическая тросовая система. Электрическая модель. Космічна наука і технологія. 2018. № 3. С. 3–10. https://doi.org/10.15407/knit2018.03.003
21. Janhunen P. Electrostatic Plasma Brake for Deorbiting a Satellite // J. Propuls. Power. 2010. Vol. 26, No. 2. P. 370–372. https://doi.org/10.2514/1.47537
22. NASA – NanoSail-D Home Page. NASA – Home. URL:http://www.nasa.gov/mission_pages/smallsats/nanosaild.html (Last accessed: 31.08.2023).
23. *Кошкин Н. И., Коробейникова Е. А., Лопаченко В. В., Меликянц С. М., Страхова С. Л., Шакун Л. С.* О характере движения микроспутника с парусом в атмосфере («NanoSail-D»). Космічна наука і технологія, 2012. Т. 18. С. 31–38. https://doi.org/10.15407/knit2012.01.031
24. Ракеты и космические аппараты конструкторского бюро «Южное». Под общей ред. С. Н. Конюхова. Днепропетровск, 2001. 240 с.
25. Satellite Missions catalogue: GOCE. URL: https://www.eoportal.org/satellite-missions/goce (Last accessed: 31.08.2023).
26. *Bombardelli C., Pelaez J.*Ion beam shepherd for contactless space debris removal. Journal of guidance, control and dynamics. 2011. Vol. 34, № 3. P. 916–920. https://doi.org/10.2514/1.51832
27. *Bombardelli C., Merino M., Ahedo E., Pelaez J., Urrutxua H., Iturri-Torreay A., Herrera-Montojoy J.* Ariadna call for ideas: Active removal of space debris ion beam shepherd for contactless debris removal. ESA Technical report. 2011. 90 p.
28. Патент № WO 2011/110701 A1 Іспанія, МПК7 B64G 1/24. System for asjusting the position and attitude of orbiting bodies using guide satellites. *C. Bombardelli*, *J. Pelaez*. PCT/ES2011/000011; заявл. 11.03.2010; опубл. 15.09.2011, 21 р.
29. *Бомбарделли К., Алпатов А. П., Пироженко А. В., Баранов Е. Ю., Осиновый Г. Г., Закржевский А. Е.* Проєкт «космического пастуха» с ионным лучом. Идеи и задачи. Космическая наука и технология. 2014. Т. 20, № 2. С. 55–60. https://doi.org/10.15407/knit2014.02.055

30. *Алпатов А. П., Закржевский А. Е., Фоков А. А., Хорошилов С. В.* Определение оптимального положения «пастуха с ионным лучом» относительно объекта космического мусора. Техническая. механика. 2015. № 2. С. 37–48.
31. *Алпатов А. П., Басс В. П., Баулин С. А., Бразинский В. И., Гусынин В. П., Даниев Ю. Ф., Засуха С. А.* Техногенное засорение околоземного космического пространства. Днепропетровск: Пороги, 2012. 380 с.
32. *Савчук А.П., Фоков А.А., Хорошилов С.В.* Расчет бесконтактного воздействия на объект космического мусора по его известному контуру. Техническая механика. 2016. № 1. С. 26–37.
33. *Lappas V.* et al. CubeSail: A low cost CubeSail based solar sail demonstration mission. Adv. Sp. Res., 2011. Vol. 48, № 11. P. 1890–1901. https://doi.org/10.1016/j.asr.2011.05.033
34. *Merino M., Ahedo E., Bombardelli C., Urrutxua H. and Pelaez J.* Ion beam shepherd satellite for space debris removal. Progress in Propulsion Physics. 2013. Vol. 4. P. 789–802. https://doi.org/10.1051/eucass/201304789
35. *Alpatov A. P., Maslova A. I., Khoroshylov S. V.* Contactless de-orbiting of space debris by the ion beam. Dynamics and control. Beau Bassin: LAP Lambert Academic Publishing, 2019. 330 p. https://doi.org/10.15407/akademperiodyka.383.170
36. *Хорошилов С. В.* Система керування відносним рухом космічного апарата для безконтактного видалення космічного сміття. Наука та інновації. 2018. № 4. С. 5–17. https://doi.org/10.15407/scin14.04.005
37. *Хорошилов С. В.* Алгоритм управления относительным движением в плоскости орбиты космического аппарата для бесконтактного удаления космического мусора. Космическая наука и технология. 2019. Т. 25, № 1. С. 14–26. https://doi.org/10.15407/scine14.04.005
38. *Alpatov A., Khoroshylov S., Bombardelli C.* Relative control of an ion beam shepherd satellite using the impulse compensation thruster. Acta Astronautica. 2018. Vol. 151. P. 543–554. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2018.06.056
39. *Dron' M., Golubek A., Dubovik L., Dreus A., Heti K.* Analysis of ballistic aspects in the combined method for removing space objects from the near-Earth orbits. Eastern-European journal of enterprise technologies. 2019. Vol. 2, № 5(98). P. 49–54. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.161778
40. *Alpatov A., Dron' M., Golubek A., Lapkhanov E.* Combined method for spacecraft deorbiting with angular stabilization of the sail using magnetorquers. CEAS Space Journal. 2022. № 15. P. 613–625. https://doi.org/10.1007/s12567-022-00469-6
41. *Golubek A., Dron' M., Dubovik L., Dreus A., Kulyk O., Khorolskiy P.* Development of the combined method to de-orbit space objects using an electric rocket propulsion system. Eastern-European journal of enterprise technologies. 2020. Vol. 4, № 5(106). P. 78–87. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.210378
42. Патент України на винахід № UA121460C2, МПК7 B64G 1/24, B64G 1/62. Спосіб безконтактного видалення об'єктів космічного сміття з навколоземних орбіт з аеродинамічним компенсатором. *А. П. Алпатов, Д. С. Своробін, О. Д. Скорик.* а201607424; заявл. 07.07.2016, опубл. 10.06.2020, Бюл. № 11. 10 с.
43. *Алпатов А. П., Своробін Д. С., Скорик О. Д.* Система безконтактного видалення об'єктів космічного сміття з навколоземних орбіт з аеродинамічним компенсатором. Технічна механіка. 2016. № 3. С. 51–56.
44. *Своробин Д. С., Фоков А. А., Хорошилов С. В.* Анализ целесообразности использования аэродинамического компенсатора при бесконтактном удалении космического мусора. Авиационно-космическая техника и технология. 2018. № 6. С. 4–11.
45. *Фоков О. А., Хорошилов С. В., Своробін Д. С.* Відносний рух космічного апарата з аеродинамічним компенсатором у перпендикулярному до площини орбіти напрямку при безконтактному видаленні космічного сміття. Космічна наука і технологія. 2021. Т. 27, № 2 (129). С. 15–27. https://doi.org/10.15407/knit2021.02.015
46. *Фоков О. А., Хорошилов С. В., Своробін Д. С.* Аналіз переваг використання аеродинамічного компенсатора при безконтактному видаленні космічного сміття. Технічна механіка. 2020. № 4. С. 55–64. https://doi.org/10.15407/itm2020.04.055
47. Алпатов А. П., Горбулин В. П. Космические платформы для орбитальных промышленных комплексов: проблемы и перспективы. Вісн. НАН України. 2013. № 12. С. 26–38. https://doi.org/10.15407/visn2013.12.026
48. *Алпатов А. П.* Информационные модели и технологии борьбы с антропогенным загрязнением ближнего космоса. Системные технологии. 2018. №3. С. 3–14.
49. *Алпатов А. П.* Космический мусор: аспекты проблемы. Технічна механіка. 2018. № 1. С. 30–47. https://doi.org/10.15407/itm2018.01.030

Отримано 06.09.2023,
в остаточному варіанті 02.10.2023