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.*

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.* a201607424; 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