

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ РАЗРАБОТОК СРЕДСТВ ОЧИСТКИ ОРБИТ В ОКОЛОЗЕМНОМ КОСМИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ ОТ ОБЪЕКТОВ КРУПНОГАБАРИТНОГО КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА

В. И. Трушляков, В. В. Юдинцев, В. А. Урбанский, С. Ю. Онищук

Омский государственный технический университет,
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

Рассмотрено состояние загрязнения околоземного космического пространства, в том числе динамика роста этого загрязнения. Приведена актуальная информация по выведению наноспутников, что является дополнительным фактором загрязнения низкой околоземной орбиты. На основании открытой информации проведен анализ разработок российских и зарубежных подходов к очистке наиболее засоренных орбит, в том числе технологические эксперименты с использованием различных средств захвата. Для различных средств захвата были рассмотрены варианты буксировки объектов космического мусора на орбиту утилизации.

Ключевые слова: космический мусор, технологические эксперименты, средства захвата, буксировка, орбита утилизации, сервисный космический аппарат.

Введение

Многочисленные исследования последних нескольких лет [1–8] направлены на разработку технологий увода крупных объектов космического мусора (КМ) для снижения риска неконтролируемого роста числа объектов космического мусора (ОКМ) в околоземное космическое пространство (ОКП) [9]. Развертывание крупных орбитальных спутниковых систем (StarLink, OneWeb) отображено на графике активности космической деятельности (рис. 1) повышает актуальность разработки систем увода космического мусора, поскольку резкий рост количества объектов (рис. 2) повышает риск его неуправляемого роста и требует проведения мероприятий по снижению этого риска.

На данный момент почти 90 стран мира были причастны к запуску на орбиту хотя бы одного космического аппарата (КА), и по количеству выведенной на околоземную орбиту полезной нагрузки за один календарный год [10].

На 2022 год, согласно отчету Европейского космического агентства, общее число объектов космического мусора превысило 30 тысяч [10].

Начало исследований по данной проблеме относится к 70–80 годам прошлого века. В настоящее время практически все страны, имеющие космические агентства (13 стран), ведут интенсивные работы в этом направлении, начиная с этапов исследований, заканчивая летными испытаниями систем. Если раньше (последние 20–30 лет) разработка технологий захвата и увода КМ останавливалась на теоретических проработках, то за последние годы в данной области были произведены первые орбитальные технологические эксперименты [11–12]. Очевидно, что технологии увода космического мусора и технологии сервисного обслуживания КА имеют много общих элементов [13].

В отчете компании NSR прогнозируется, что к 2030 году услуги выделенных миссий активно-го увода КМ принесут более 64 миллионов долла-

ров совокупной выручки, что является только 1 % от всех возможных услуг обслуживания спутников на геостационарной орбите (ГСО) и других орбитах (рис. 3).

Как следует из приведённой информации на рис. 3, увод с орбит крупногабаритного космического мусора является начальным этапом нового направления в практической космонавтике — сервисного обслуживания КА на орбите, и имеет значительные перспективы повышения эффективности ракетно-космической деятельности и освоения околоземного космического пространства.

К 2030 году совокупный рынок увода КМ будет составлять более полутора сотен спутников (рис. 4). По мнению представителя Космических сил США, очистка орбит от КМ рассматривается государственными и военными заказчиками в качестве приоритетной задачи, а темпы технологического развития в коммерческом секторе дают уверенность в том, что это перспективный рынок. Если учесть, что в следующем десятилетии правительственный и военный сектор планирует запустить свыше 3000 КА, стоимость производства которых оценивается в 290 миллиардов долларов (почти в 5 раз больше, чем в коммерческом секторе), коммерческий рынок активного увода космического мусора ожидает рост [14].

На рис. 5 приведён прогноз рынка увода КМ компании Astroscale, основанный на предположении о вероятности отказа новых выводимых КА. Нижняя граница (темные столбцы) количества потенциальных объектов для увода построена для низкой вероятности отказов: все спутники самостоятельно уходят с орбиты в конце срока их эксплуатации, вероятность отказа составляет 4,3 % в течение их расчетного срока службы. Верхняя граница построена для высокой вероятности отказов — 15,6 %.

Потенциальными потребителями услуг увода КМ могут быть операторы спутниковых систем, национальные космические агентства, страховые компании [15].

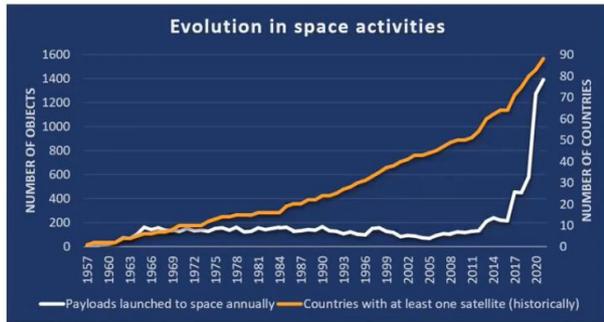


Рис. 1. График увеличения активности в космической деятельности [10]
Fig. 1. Graph of increasing activity in space operations

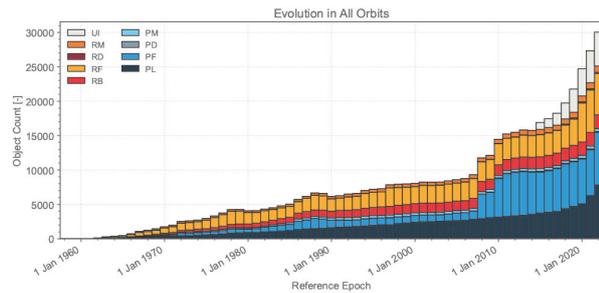


Рис. 2. Динамика роста загрязненности околоземного космического пространства [10]
Fig. 2. Dynamics of the growth of pollution of near-Earth space [10]

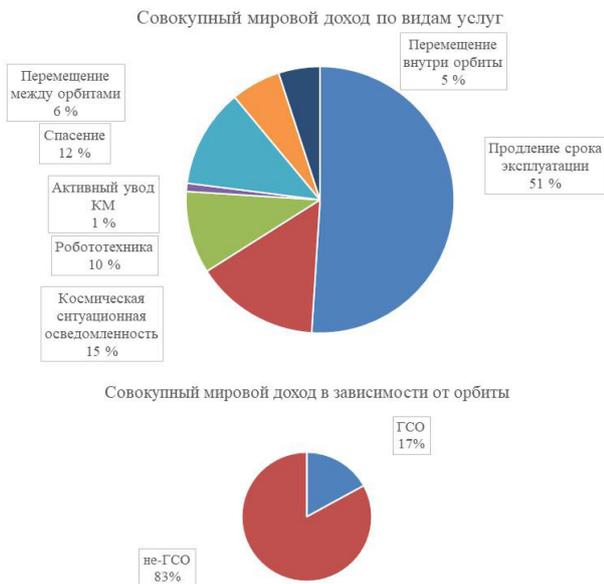


Рис. 3. Совокупный мировой доход по видам услуг обслуживания на орбите и в зависимости от орбиты
Fig. 3. Total global income by types of services in orbit and depending on the orbit

Кроме крупных орбитальных спутниковых систем, возрастает количество выводимых наноспутников типа CubeSat. По проведенному анализу каждый последующий год количество выводимых наноспутников на различные орбиты Земли будет только увеличиваться, соответственно увеличивается и количество космического мусора [16]. Только к середине 2022 года было запущено 2068 наноспут-

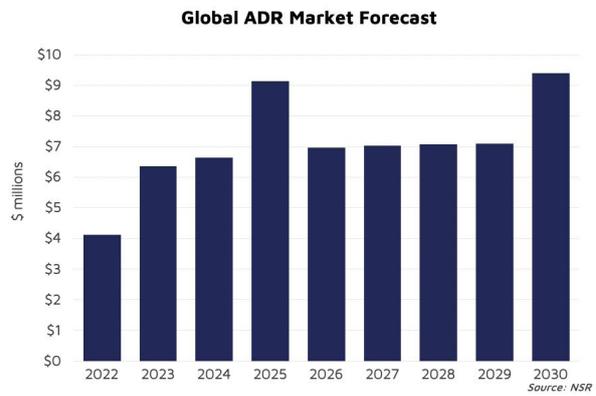


Рис. 4. Прогноз рынка активного увода космического мусора
Источник: <https://www.nsr.com/> (дата обращения: 09.10.2022)
Fig. 4. Prediction of the active removal of space debris market
Source: <https://www.nsr.com/> (accessed: 09.10.2022)

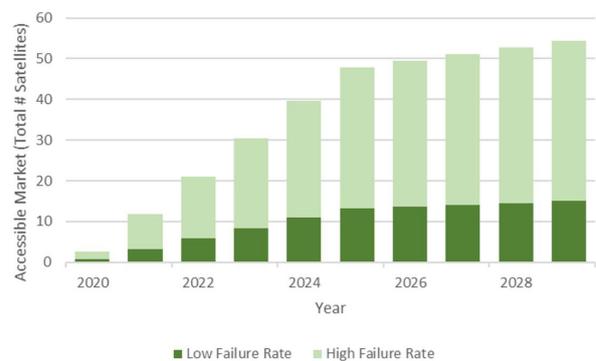


Рис. 5. Прогноз рынка компании Astroscale [15]
Fig. 5. Astroscale market prediction [15]

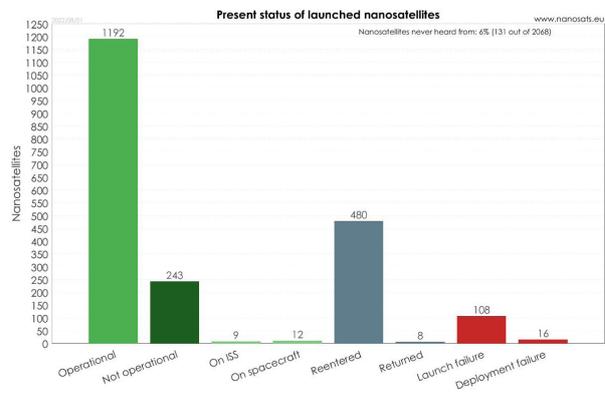


Рис. 6. Текущий статус запущенных наноспутников [16]
Fig. 6. Current status of launched nanosatellites [16]

ников, из них 243 уже являются неуправляемыми космическими аппаратами (рис. 6).

Более 40 % процентов выводимых кубсатов приходится на образовательные организации и исследовательские институты. Такой скачок обусловлен небольшими габаритами, малой массой, простотой конструкции и стандартизацией кубсатов различных размеров (форм-факторов), что упрощает изучение ОКП, проведение технологических и научных экспериментов (рис. 7).

Если с КА, выводимыми на орбиту с перигеем менее 400 км, проблем нет, так как продолжитель-

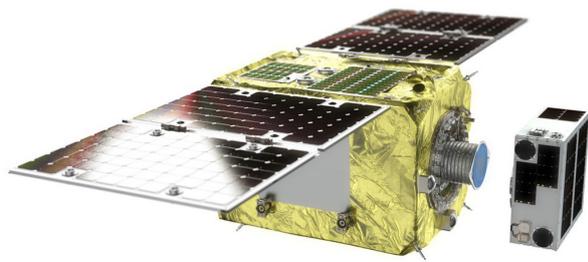


Рис. 12. Демонстратор технологий захвата и увода КМ ELSA-d [19]
Fig. 12. Demonstrator of KM capture and removal technologies ELSA-d [19]

магнитную систему захвата, предполагающую установку на активный КА нескольких постоянных магнитов на подвижной платформе и ферромагнитную пластину на мишень [11].

В декабре 2020 г. европейское космическое агентство подписало контракт на 104 миллиона долларов с ClearSpace с целью разработать несколько технологий обслуживания на орбите, включая одну миссию по активному перемещению оставшегося 100-килограммового фрагмента разгонного блока РН «Vega».

В октябре 2021 г. в Китае успешно вывели на орбиту КА Шицзянь-21 (рис. 13). КА создан в 509-м институте Шанхайской исследовательской академии космической техники (SAST) и предназначен для тестирования и проверки технологий по захвату и уводу ОКМ на ГСО. Ранее, в сентябре 2021 г., SAST представила концепцию сервисного КА на авиашоу в Чжухае, который, так же как и КА MEV-1, предназначен для продления срока службы спутников на ГСО [20].

2. Российские проекты

В рамках совместного проекта ООО «НПЦ «Малые космические аппараты» (ООО «НПЦ «МКА») и АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва» (АО «ИСС») «Разработка концепции сервисного космического аппарата для очистки области геостационарной орбиты от объектов космического мусора техно-

генной природы» разработаны концепции технического облика сервисного КА для воздействия на объекты космического мусора; разработаны электронные трехмерные модели сервисного КА для двух вариантов исполнения манипулятора; проведена разработка типовых бюджетов массы и энергетического бюджета в объеме проектных оценок; разработаны комплекты эскизной документации на сервисный КА двух вариантов; проведены сравнительные исследования концептуальных вариантов целевой аппаратуры разрабатываемого сервисного космического аппарата (СКА) по проекту и вариантов целевой аппаратуры для воздействия на ОКМ зарубежных сервисных КА. Разработанная концепция технического облика СКА может быть использована для разработки как сервисного КА для увода ОКМ техногенной природы из защищаемой области геостационарной орбиты при многократном маневрировании, так и разработки КА обслуживания спутников (заправка, ремонт) при измененной целевой аппаратуре.

В рамках НИОКТР «Механика космического полета», проводимых в Московском авиационном институте, исследовалась динамика движения транспортируемого объекта под действием ионного пучка, в частности, разработаны математические модели, описывающие движение пассивного космического объекта при воздействии на него ионного пучка, создаваемого активным космическим аппаратом; предложены новые законы и способы управления активным космическим аппаратом и создаваемым им ионным пучком для решения задач стабилизации колебаний пассивного объекта относительно его центра масс и изменения параметров орбиты пассивного объекта; выполнен анализ влияния формы и массовой компоновки пассивного объекта на его движение относительно центра масс при бесконтактном воздействии; изучены регулярные и хаотические режимы движения пассивного спутника с прикрепленными к нему упругими панелями солнечных батарей при его бесконтактной транспортировке с помощью ионного пучка.

В рамках работы «Прикладные научные исследования системы и средств бесконтактного увода объектов космического мусора техногенной природы в целях противодействия угрозе осуществления космической деятельности в области геостационарной орбиты» разработан экспериментальный образец высокочастотного ионного инжектора для

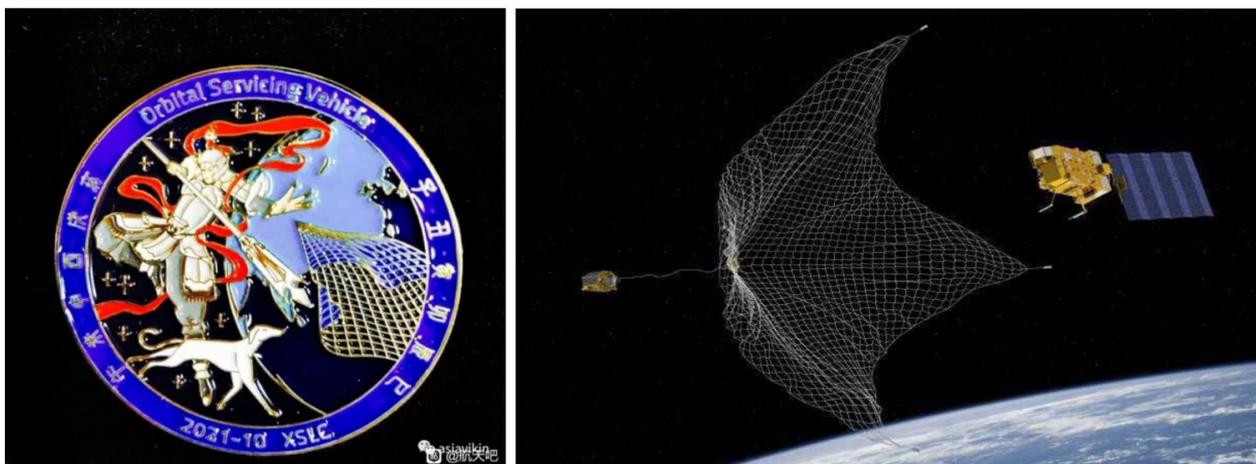


Рис. 13. Шицзянь-21 [20]
Fig. 13. Shijian-21 [20]

оснащения им СКА в качестве полезной нагрузки. СКА строится на базе унифицированной платформы разработки Акционерного общества «Информационные спутниковые системы имени академика М. Ф. Решетнёва» «Экспресс-1000НМ». Часть бортовых служебных систем платформы дорабатывается для сопряжения с системой бесконтактного увода ОКМ из защищаемой области геостационарной орбиты. Целью работы является разработка опытного образца высокочастотного ионного инжектора и проведение его исследовательских испытаний с целью подтверждения возможности создания на его базе системы бесконтактного увода ОКМ техногенной природы из защищаемой области ГСО.

Описанные выше проекты направлены на разработку технологии увода ОКМ с бесконтактным воздействием на объект потоков частиц. Этот способ больше подходит для вывода отработавших спутников из защищаемой области ГСО на орбиту захоронения. Для увода ОКМ из области низких околоземных орбит более пригодны способы увода с прямым механическим воздействием на ОКМ. В этом случае космический буксир (КБ) выполняет захват ОКМ и уводит связку на орбиту утилизации — к границе атмосферы Земли, осуществляя вход в атмосферу в заданной области, для падения возможных фрагментов ОКМ в несудоходной области мирового океана. Механическая связь между буксиром и ОКМ может быть жесткой, сформированной при помощи манипулятора [21], стыковочного устройства типа «штанга-конус», или нежесткой, сформированной сетью [22] или гарпуном [23] на тросовой связи.

В работах «Динамика и управление захватом и транспортировкой космического мусора с использованием тросовых систем» и «Технологии захвата и транспортировки крупногабаритного космического мусора при помощи упругих устройств» анализировались динамические процессы при буксировке ОКМ на тросовой связи с учетом упругих свойств конструкции ОКМ, наличия остатков топлива в баках. В проекте МГТУ им. Н. Э. Баумана «Анализ технической реализуемости способов увода крупных объектов космического мусора с околоземных орбит и определение проектного облика КА, обеспечивающего их сведение с орбиты» разработаны проектные решения для перспективного КА, способного осуществлять перелёты между крупными ОКМ с целью их увода на орбиты захоронения, методики составления схем перелётов между ОКМ, проектирования робототехнических средств воздействия на ОКМ, а также методики определения ориентации ОКМ по его 3D-модели. Рассмотрены варианты такого КА для низких, средних и высоких целевых орбит.

Облик космического комплекса для увода ОКМ из низкой околоземной орбиты (НОО) проработан в патенте МГТУ им. Н. Э. Баумана [24], где предложен космический комплекс для утилизации группы объектов крупногабаритного космического мусора (рис. 14), который состоит из базового КА 2 и нескольких тормозных двигательных модулей 3. Базовый КА с размещенными на нем тормозными двигательными модулями осуществляет при помощи двигательного модуля 4 маневры дальнего и ближнего наведения, а также сближение с выбранным ОКМ 1 до дистанции порядка 10 м. После сближения базовый КА устанавливает при помощи манипулятора 9 тормозной двигательный модуль в сопло ОКМ 11. Далее связка базового КА и ОКМ

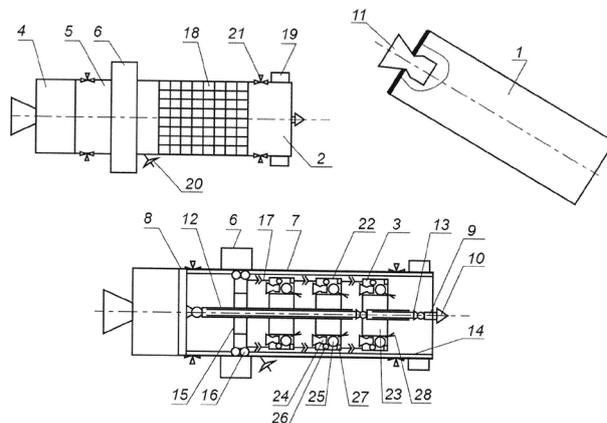


Рис. 14. Космический комплекс для утилизации группы объектов крупногабаритного космического мусора [24]

- 1 — объект крупногабаритного КМ; 2 — базовый КА; 3 — тормозной двигательный модуль (ТДМ); 4 — двигательный модуль; 5 — модуль полезной нагрузки (МПН); 6 — агрегатный модуль; 7 — контейнер МПН; 8 — днище МПН; 9 — стыковочный манипулятор; 10 — стыковочный агрегат; 11 — сопло маршевой двигательной установки КМ; 12 — звено манипулятора; 13 — телескопическое звено; 14 — направляющие; 15 — каретка; 16 — привод; 17 — узлы сцепки; 18 — панель солнечных батарей; 19 — датчики системы сближения и захвата; 20 — антенно-фидерные устройства; 21 — двигатели стабилизации и ориентации; 22 — корпус ТДМ; 23 — центральное отверстие ТДМ; 24 — жидкостной ракетный двигатель ТДМ; 25 — баки ТДМ; 26 — баллон надува ТДМ; 27 — блоки бортового комплекса управления ТДМ; 28 — агрегаты стыковки к КМ

Fig. 14. Space system for recycling large-size space debris [24]:

- 1 — object of large-sized SD; 2 — basic spacecraft; 3 — brake propulsion module (BPM); 4 — propulsion module; 5 — payload module (PM); 6 — aggregate module; 7 — PM container; 8 — bottom of PM; 9 — docking manipulator; 10 — docking unit; 11 — nozzle of main propulsion system; 12 — manipulator link; 13 — telescopic link; 14 — rails; 15 — carriage; 16 — drive; 17 — coupling assemblies; 18 — solar panels; 19 — sensors of approach and capture system; 20 — antenna-feeder devices; 21 — stabilization and orientation engines; 22 — BPM body; 23 — BPM central aperture; 24 — BPM liquid propellant engine; 25 — BPM tanks; 26 — BPM supercharger; 27 — BPM onboard control system units; 28 — docking units to KM

с закрепленным тормозным двигательным модулем ориентируется в пространстве, используя систему управления базового КА, после чего ОКМ отделяется от базового КА и тормозной двигательный модуль выдает импульс для увода ОКМ на орбиту утилизации.

Научно-производственное объединение (НПО) машиностроения в патенте [25] также предлагает использовать для увода КА — носитель автономных модулей, отделяемых в окрестности выбранного ОКМ (рис. 15). В отличие от решения МГТУ им. Н. Э. Баумана, космическая система, предлагаемая НПО машиностроения, предполагает, что модули будут выполнять автономное сближение и захват ОКМ в соответствии с программой, получаемой до отделения от носителя автономных модулей.

ГНЦ РФ Федеральное государственное автономное научное учреждение «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики» (ЦНИИ РТК) проводил работы по государственно-

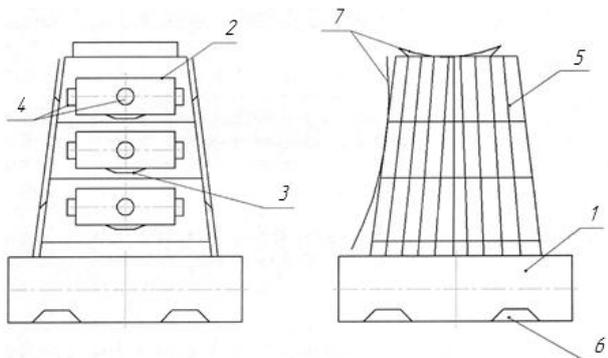


Рис. 15. Многомодульный космический аппарат для очистки геостационарной орбиты [25]:

- 1 — многомодульный космический аппарат (МКА), базовый блок; 2 — модуль автономного маневрирования (МАН); 3 — головка самонаведения МАН; 4 — двигательные установки МАН; 5 — энергоустановка МКА; 6 — двигательная установка МКА; 7 — бортовые средства наблюдения МКА за сводимым с орбиты КА

Fig. 15. Multimodule spacecraft for cleaning up geostationary orbit [25]: 1 — multimodular spacecraft (MSC), basic unit; 2 — autonomous maneuvering module (AMM); 3 — AMM homing head; 4 — AMM propulsion systems; 5 — MSC power plant; 6 — MSC propulsion system; 7 — MSC onboard observation facilities for spacecraft being taken out of orbit

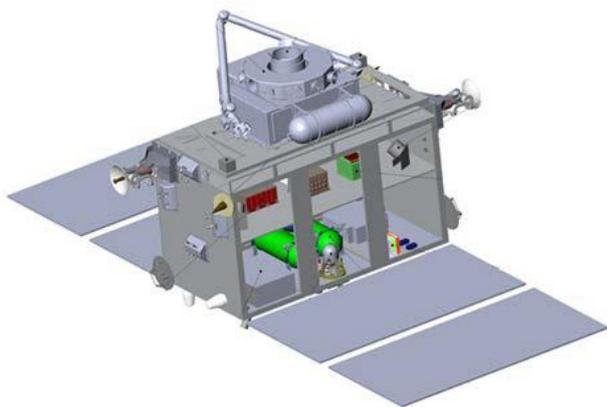


Рис. 16. Манипуляторный сервисный космический аппарат [26]

Fig. 16. Manipulative service spacecraft [26]

му контракту № 14.578.21.0046 «Разработка технического (проектного) облика робототехнической системы с оцувствленными по усилию манипуляторами в составе сервисного космического аппарата (КА)». В рамках НИР был сформирован проектный облик и общие технические характеристики сервисного КА, оснащенного робототехнической системой с оцувствленными по усилию манипуляторами (рис. 16). Разработан автоматизированный макет манипулятора для экспериментальной отработки контактных и сбросочных операций с заданной точностью [26]. Успешно произведена наземная отработка стыковки «штырь — стакан».

3. Анализ способов орбитальной транспортировки

Известные способы транспортировки ОКМ можно разделить на следующие типы:

- буксировка на жесткой связи;
- бесконтактная буксировка;

— тросовая буксировка (буксировка на упругой связи);

— буксировка на вращающейся тросовой связи.

Сравнение различных вариантов орбитальной транспортировки ОКМ приведено в табл. 1.

3.1. Буксировка на жесткой связи

Жесткая связь предполагает формирование механической связи между КМ и разгонным блоком (РБ) при помощи манипуляторов, устанавливаемых на РБ, или других устройств захвата, формирующих жесткую связь между РБ и ОКМ [27]. Для управляемого увода объекта ОКМ при помощи РБ такая механическая связь должна быть сформирована таким образом, чтобы положение центра масс связки было близко к линии действия тяги РБ, и жесткость связи не должна приводить к нарушению устойчивости связки в процессе орбитальной транспортировки. Для выполнения этих требований захват объекта ОКМ типа орбитальная ступень должен производиться со стороны оси симметрии ступени, используя робот манипулятор для захвата стыковочного шпангоута переходного отсека ступени или устройство типа штанга-конус, используя в качестве стыковочного порта сопло двигателя. Устройство захвата при этом должно обеспечивать возможность совмещения продольных осей РБ и ОКМ перед запуском двигателя РБ (рис. 17).

Приведенная схема позволяет использовать в качестве буксиров существующие РБ, поскольку используется толкающая схема буксировки, однако требует от РБ выполнения операций сближения и стыковки с ОКМ, для которых РБ не предназначен. Таким образом, совмещение функций захвата ОКМ и буксировки ОКМ в рамках одного космического буксира усложняет использование существующих РБ.

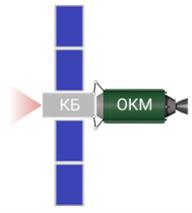
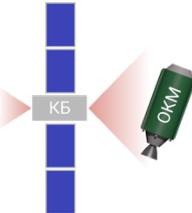
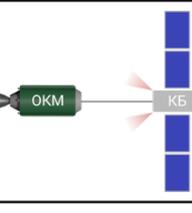
Толкающая схема буксировки при жесткой связи между КБ и ОКМ применима для объектов ОКМ симметричной формы, таких как отработавшие ступени РН. В этом случае продольная ось сопла, к которому стыкуется перехватчик, должна совпадать с продольной осью объекта ОКМ, на которой располагается его центр масс. В противном случае при работе двигателя РБ будет возникать возмущающий момент, который система управления РБ должна будет непрерывно парировать. Эта особенность ограничивает возможность применения толкающей схемы буксировки на жесткой связи.

3.2. Бесконтактная буксировка

Бесконтактные способы буксировки предполагают воздействие на ОКМ силовых полей, излучения, потоков частиц. ОКМ небольших размеров могут быть сведены с орбиты воздействием лазерным излучением с поверхности Земли или с борта КА — уборщика мусора. В области ГСО возможно использование силы кулона для воздействия на ОКМ [28]. Проекты МАИ посвящены бесконтактной буксировке за счет воздействия на ОКМ потока частиц, создаваемого, например, ионным двигателем [29, 30].

Эта схема позволяет воздействовать на объект с безопасных расстояний. Следует отметить, что воздействие потока на космический мусор сложной формы может привести к возникновению нежелательного её вращения, что может снизить эффективность воздействия и усложнит управление относительным движением буксира. Сила, действующая на космический мусор, имеет порядок десятков миллиньютонов, что делает практически невозможным управляемый вход ОКМ в атмосферу Земли

Таблица 1. Сравнение способов увода объектов космического мусора
Table 1. Comparison of methods of removal of space debris objects

Схема	Описание	Возможность адаптации существующих орбитальных средств для решения задач буксировки	Типы ОКМ	Возможность использования нежесткой связи	Продолжительность увода	Возможность оперативного увода на орбиту утилизации	Управляемый вход в атмосферу
	Буксировка на жесткой связи	Нет	Осесимметричные	Нет	Часы	Да	Да
	Бесконтактная буксировка	Спутниковые платформы для ГСО	Любые	—	Месяцы	Нет	Нет
	Тросовая буксировка по тянущей схеме	Нет	Любые	Да	Месяцы	Да	Да
	Буксировка на вращающейся тросовой связи	Существующие РБ	Любые	Да	Часы	Да	Да

при рассмотрении этого способа для увода ОКМ с низких околоземных орбит.

3.3. Тросовая буксировка

Другая известная схема буксировки ОКМ, широко рассматриваемой в работах, посвященных способам увода ОКМ, — тянущая схема буксировки на тросовой связи (рис. 18) [31]. Тросовая связь КБ с ОКМ может быть сформирована при помощи гарпуна, сети. Трос также может быть доставлен к ОКМ при помощи отделяемого автономного стыковочного модуля (АСМ) [32].

Такая схема буксировки не требует от РБ выполнения несвойственных ему операций сближения с ОКМ только при использовании отделяемого автономного стыковочного модуля для формирования тросовой связи.

Тянущая схема буксировки не позволяет использовать РБ или орбитальные ступени с традиционной компоновкой, поскольку в этом случае адаптер для установки АСМ и устройство управления тросом должно располагаться в кормовой части буксира, где расположена двигательная установка. Кроме этого, при тянущей схеме буксировки на тросовой связи существует опасность повреждения троса при работе двигателя РБ.

3.4. Буксировка на вращающейся тросовой связи

Вращение тросовой системы позволяет использовать толкающую схему буксировки на тросовой

связи [33] (рис. 19). Вращение тросовой системы приводит к растяжению троса. Сила натяжения троса позволяет прикладывать силу тяги буксира вдоль троса для изменения скорости центра масс связи. Например, для уменьшения высоты орбиты связи двигатель РБ должен запускаться, когда проекция вектора силы тяги на направление вектора скорости центра масс связи отрицательная (рис. 19).

На рис. 19 показана вращающаяся тросовая система, состоящая из КБ и АСМ с захваченным ОКМ.

На рисунке показан вектор скорости центра масс связи (V_c) и направление силы тяги P . Вращающаяся тросовая система показана в момент, когда проекция вектора силы тяги на направление скорости центра масс отрицательна. В этот момент двигатель КБ работает, обеспечивая снижение высоты связи. Увод с орбиты связи осуществляется последовательными включениями двигателя КБ.

Выводы

1. Учитывая, что наиболее опасной областью ОКП является область низких орбит, целесообразной является разработка космической системы для увода КМ, ориентированная именно на низкие орбиты.

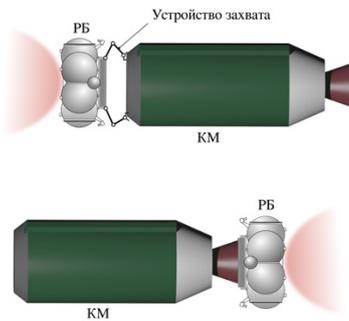


Рис. 17. Варианты захвата объекта КМ типа орбитальная ступень [33]
Fig. 17. Variants of capturing a SD object of the orbital stage type [33]



Рис. 18. Тянущая схема буксировки на гибкой связи [33]
Fig. 18. Pulling scheme of towing on a flexible coupling [33]

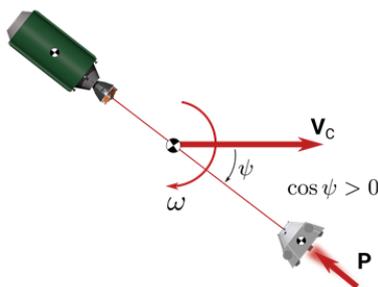


Рис. 19. Схема увода ОКМ на вращающейся тросовой связи [33]
Fig. 19. The scheme of SDO removal on a rotating tether coupling [33]

2. Результаты анализа текущего состояния исследований в области разработки систем активной очистки ОКП от крупногабаритных ОКМ показывают активную разработку элементов таких систем за рубежом, при этом некоторые проекты вошли в фазу орбитальных демонстрационных экспериментов и летных испытаний. Активно развиваются и начали использоваться системы сервисного обслуживания КА на орбите.

3. Анализ зарубежных исследований показывает, что проекты компании Northrop Grumman, проект «Kusg Orbital» ориентированы на сервисные операции, включая увод отработавших спутников на орбиту захоронения, в области ГСО, не рассматривая область низких околоземных орбит, где количество ОКМ представляет большую угрозу. Способ захвата ОКМ при помощи охватывающих ОКМ манипуляторов, применяемый в проекте Clear Space, предполагает толкающую схему буксировки и ограничен осесимметричными слабовращающимися ОКМ. Способ захвата и увода ОКМ компании Astroscale предполагает предварительную установку на ОКМ ферромагнитной пластины, что не позволяет использовать эту технологию для существующих ОКМ.

4. Российские исследования в этой области сконцентрированы на разработке бесконтактных способов увода КМ с геостационарной орбиты. К настоящему моменту ни один российский проект не вышел на стадию летных испытаний. Анализ проводимых в России исследований показывает, что, с точки зрения объема финансирования и детальности проработки, проекты сфокусированы на разработке технологий бесконтактного увода ОКМ с области геостационарной орбиты. В российских проектах мало внимания уделяется ОКМ на НОО, представляющим большую угрозу для космической деятельности.

5. Для снижения стоимости разработки космической системы для увода ОКМ целесообразно использовать такие способы захвата и увода, которые бы позволили адаптировать имеющиеся орбитальные средства к использованию в составе такой космической системы.

6. Реализуемость и преимущество буксировки на вращающейся тросовой связи для захвата и увода ОКМ в сравнении с предлагаемыми в табл. 1 решениями, основывается на максимальном использовании существующего исследовательского, научно-технического, проектно-конструкторского, технологического и производственного задела, существующей наземной экспериментальной базы, существующих и перспективных комплексов ракетносителей, РБ, наземных систем управления космическими объектами на орбитах в ОКП.

Благодарности

Исследования проведены в рамках программы развития ОмГТУ «Приоритет-2030».

Библиографический список

1. Bonnal C., Ruault J.-M., Desjean M.-C. Active debris removal: Recent progress and current trends // Acta Astronautica. 2013. Vol. 85. P. 51–60.
2. Huang P., Zhang F., Dongke W. [et al.]. A review of space tether for on-orbit servicing // Progress in Aerospace Sciences. 2015. DOI: 10.1016/j.paerosci.2015.12.006.
3. Shan M., Guo J., Gill E. Review and comparison of active space debris capturing and removal methods // Progress in Aerospace Sciences. 2015. Vol. 80. P. 18–32. DOI: 10.1016/j.paerosci.2015.11.001.
4. Hakima H., Emami M. R. Assessment of active methods for removal of LEO debris // Acta Astronautica. 2018. Vol. 144. P. 225–243. DOI: 10.1016/j.actaastro.2017.12.036.
5. Wormnes K. [et al.]. ESA technologies for space debris remediation // 6th European Conference on Space Debris. Darmstadt, Germany. ESA Communications, 2013. P. 1–2.
6. Battista U. [et al.]. Design of net ejector for space debris capturing // 7th European Conference on Space Debris. Germany, Darmstadt. ESA Space Debris Office, 2017. P. 18–21.
7. Tadani P. [et al.]. Active debris multi-removal mission concept based on hybrid propulsion // Acta Astronautica. 2014. Vol. 103. P. 26–35. DOI: 10.1016/j.actaastro.2014.06.027.
8. Benvenuto R., Lavagna M., Salvi S. Multibody dynamics driving GNC and system design in tethered nets for active debris removal // Advances in Space Research. 2016. Vol. 58, № 1. P. 45–63. DOI: 10.1016/j.asr.2016.04.015.
9. Kessler D. J., Su S.-Y. Orbital Debris // Nasa Cp 2360. 1982.
10. ESA's Annual Space Environment Report 2022 // European Space Agency Space Debris Office, Darmstadt, Germany. 2022. 120 P. URL: https://www.esa.int/Safety_Security/Space_Debris/ESA_s_Space_Environment_Report_2022 (дата обращения: 12.05.2022).



11. Blackerby C. [et al.]. Elsa-D: an in-Orbit End-of-Life Demonstration Mission // In Proceedings of the International Astronautical Congress, IAC. 2018. URL: <https://astroscale.com/wp-content/uploads/2018/09/ELSA-1-Conference-IAC-2018-v1.1.pdf> (дата обращения: 12.05.2022).
12. Lappas V. J. [et al.]. RemoveDEBRIS: An EU low cost demonstration mission to test ADR technologies // Proc. Int. Astronaut. Congr. IAC. 2014. Vol. 3. P. 1612–1623.
13. Parsonson A. ESA signs contract for first space debris removal mission // SpaceNews. 2020. URL: <https://spacenews.com/clearspace-contract-signed/> (дата обращения: 05.05.2021).
14. Erwin S. U.S. Space Force would support commercial services to remove orbital debris // SpaceNews. 2021. URL: <https://spacenews.com/u-s-space-force-would-support-commercial-services-to-remove-orbital-debris/> (дата обращения: 05.05.2021).
15. Brettle H. [et al.]. Towards a future debris removal service: Evolution of an ADR business model // 70th International Astronautical Congress (IAC), Washington D.C., United States, 21–25 October. 2019. 12 p.
16. Kulu E. Nanosatellite Launch Forecasts — Track Record and Latest Prediction // 36th Annual Small Satellite Conference, Aug 9. 2022. P. 17.
17. Kramer H. J. MEV-1 (Mission Extension Vehicle-1) and MEV-2 // eoPortal Directory. 2019. URL: <https://eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/m/mev-1> (дата обращения: 05.05.2021).
18. Erwin S. Startup using Soviet-era technology to build satellite servicing vehicle // SpaceNews. 2021. URL: <https://spacenews.com/space-startup-using-soviet-era-technology-to-build-satellite-servicing-vehicle/> (дата обращения: 05.05.2021).
19. Werner D. Astroscale announces 2021 Soyuz launch of ELSA-d mission // SpaceNews. 2020. URL: <https://spacenews.com/astro-scale-elsa-d-launch-2021/> (дата обращения: 05.05.2021).
20. CNSA Watcher, Supplemental service aircraft, (2021). URL: <https://twitter.com/CNSAWatcher/status/1436257779195555857> (дата обращения: 01.05. 2021).
21. Felicetti L., Gasbarri P., Pisculli A., Sabatini M., Palmerini G. B. Design of robotic manipulators for orbit removal of spent launchers' stages // Acta Astronautica. 2016. Vol. 119. P. 118–130. DOI: 10.1016/j.actaastro.2015.11.012.
22. Botta E. M. Deployment and Capture Dynamics of Tether-Nets for Active Space Debris Removal. McGill University, Montreal, 2017.
23. Dudziak R., Tuttle S., Barraclough S. Harpoon technology development for the active removal of space debris // Adv. Sp. Res. 2015. Vol. 56. P. 509–527. DOI: 10.1016/j.asr.2015.04.012.
24. Пат. 2695155 Российская Федерация, МПК В 64 G 1/00. Космический комплекс для утилизации группы объектов крупногабаритного космического мусора / Щеглов Г. А., Стогний М. В. № 2018145193; заявл. 19.12.18; опубл. 22.07.19, Бюл. № 21.
25. Пат. 2573015 Российская Федерация, МПК В 64 G 1/00. Многомодульный космический аппарат для очистки геостационарной орбиты и способ очистки геостационарной орбиты / Леонов А. Г., Ефремов Г. А., Широков П. А., Палкин М. В. № 2014114880; заявл. 16.04.14; опубл. 27.10.15, Бюл. № 2.
26. Даляев И. Ю., Шардыко И. В. Макетный образец манипуляционной системы сервисного космического аппарата // Экстремальная робототехника: тр. междунар. научн.-техн. конф. Санкт-Петербург: ООО АП4Принт, 2016. С. 411–415.
27. Felicetti L., Gasbarri P., Pisculli A. [et al.]. Design of robotic manipulators for orbit removal of spent launchers' stages // Acta Astronaut. 2016. Vol. 119. P. 118–130. DOI: 10.1016/j.actaastro.2015.11.012.
28. Schaub H., Jasper L. E. Z. Orbit Boosting Maneuvers for Two-Craft Coulomb Formations // Journal of Guidance, Control, and Dynamics. 2013. Vol. 36 (1). P. 74–82. DOI: 10.2514/1.57479.
29. Feili D., Smirnova M., Dobkevicius M. [et al.]. Impulse Transfer Thruster for an Ion Beam Shepherd Mission. 2015. P. 1–9.
30. Merino M., Ahedo E., Bombardelli C. [et al.]. Ion beam shepherd satellite for space debris removal // Prog. Propuls. Phys. 2013. Vol. 4. P. 789–802. DOI: 10.1051/eucass/201304789.
31. Jasper L., Schaub H. Input shaped large thrust maneuver with a tethered debris object // Acta Astronaut. 2014. Vol. 96. P. 128–137. DOI: 10.1016/j.actaastro.2013.11.005.
32. Пат. 2531679 Российская Федерация, МПК В 64 G1/16, В 64 G1/24. Способ очистки орбит от космического мусора / Трушляков В. И., Макаров Ю. Н., Олейников И. И., Штаров Я. Т. № 2012136161/11; заявл. 21.08.12; опубл. 27.10.14, Бюл. № 30.
33. Trushlyakov V. I., Yudinsev V. V. Rotary space tether system for active debris removal // Journal of Guidance Control and Dynamics. 2020. Vol. 43. P. 354–364. DOI: 10.2514/1.G004615.

ТРУШЛЯКОВ Валерий Иванович, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Авиа- и ракетостроение» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 2910-2159

AuthorID (РИНЦ): 9914

ORCID: 0000-0002-8444-6880

AuthorID (SCOPUS): 35792803600

Researcher ID: D-7270-2015

Адрес для переписки: vatrushlyakov@yandex.ru

ЮДИНЦЕВ Вадим Вячеславович, кандидат технических наук, доцент (Россия), старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Парогазовые смеси в конструкциях ракет-носителей», ОмГТУ, г. Омск.

ORCID: 0000-0002-3244-017X

AuthorID (SCOPUS): 36676070000

Researcher ID: N-1367-2014

Адрес для переписки: yudinsev@gmail.com

УРБАНСКИЙ Владислав Александрович, аспирант кафедры «Авиа- и ракетостроение» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 2487-9142

ORCID: 0000-0002-8837-7050

AuthorID (РИНЦ): 978934

AuthorID (SCOPUS):

Researcher ID: AAX-1703-2021

Адрес для переписки: vladurba95@gmail.com

ОНИЩУК Сергей Юрьевич, аспирант кафедры «Авиа- и ракетостроение» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 6122-7947

AuthorID (РИНЦ): 979474

ORCID: 0000-0002-9641-5459

AuthorID (SCOPUS): 57211128570

Researcher ID: D-9183-2019

Адрес для переписки: onishchuksy@gmail.com

Для цитирования

Трушляков В. И., Юдинцев В. В., Урбанский В. А., Онищук С. Ю. Анализ состояния разработок средств очистки орбит в околоземном космическом пространстве от объектов крупногабаритного космического мусора // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2022. Т. 6, № 4. С. 42–52. DOI: 10.25206/2588-0373-2022-6-4-42-52.

Статья поступила в редакцию 03.11.2022 г.

© В. И. Трушляков, В. В. Юдинцев, В. А. Урбанский, С. Ю. Онищук

THE ANALYSIS OF THE STATE OF DEVELOPMENT OF DEVICES FOR CLEANING ORBITS IN NEAR-EARTH SPACE FROM LARGE-SIZED SPACE DEBRIS OBJECTS

V. I. Trushlyakov, V. V. Yudinsev, V. A. Urbansky, S. Yu. Onishchuk

Omsk State Technical University,
Russia, Omsk, Mira Ave., 11, 644050

The state of near-Earth space pollution is considered, including the dynamics of growth of this pollution. Presented current information on the launch of nano-satellites, which is an additional factor in the pollution of low earth orbit. On the basis of open information, the analysis of the development of Russian and foreign approaches to the most polluted orbits cleaning, including technological experiments with the use of various means of capture is carried out. For different capture devices the options of towing space debris objects to the disposal orbit are considered.

Keywords: space debris, technological experiments, capture devices, towing, disposal orbit, service spacecraft.

Acknowledgments

Research is conducted as part of the OmSTU Priority 2030 development programme.

References

1. Bonnal C., Ruault J.-M., Desjean M.-C. Active debris removal: Recent progress and current trends // *Acta Astronautica*. 2013. Vol. 85. P. 51–60. (In Engl.).
2. Huang P., Zhang F., Dongke W. [et al.]. A review of space tether for on-orbit servicing // *Progress in Aerospace Sciences*. 2015. DOI: 10.1016/j.paerosci.2015.12.006. (In Engl.).
3. Shan M., Guo J., Gill E. Review and comparison of active space debris capturing and removal methods // *Progress in Aerospace Sciences*. 2015. Vol. 80. P. 18–32. DOI: 10.1016/j.paerosci.2015.11.001. (In Engl.).
4. Hakima H., Emami M. R. Assessment of active methods for removal of LEO debris // *Acta Astronautica*. 2018. Vol. 144. P. 225–243. DOI: 10.1016/j.actaastro.2017.12.036. (In Engl.).
5. Wormnes K. [et al.]. ESA technologies for space debris remediation // 6th European Conference on Space Debris. Darmstadt, Germany. ESA Communications, 2013. P. 1–2. (In Engl.).
6. Battista U. [et al.]. Design of net ejector for space debris capturing // 7th European Conference on Space Debris. Germany, Darmstadt. ESA Space Debris Office, 2017. P. 18–21. (In Engl.).
7. Tadini P. [et al.]. Active debris multi-removal mission concept based on hybrid propulsion // *Acta Astronautica*. 2014. Vol. 103. P. 26–35. DOI: 10.1016/j.actaastro.2014.06.027. (In Engl.).
8. Benvenuto R., Lavagna M., Salvi S. Multibody dynamics driving GNC and system design in tethered nets for active debris removal // *Advances in Space Research*. 2016. Vol. 58, № 1. P. 45–63. DOI: 10.1016/j.asr.2016.04.015. (In Engl.).
9. Kessler D. J., Su S.-Y. Orbital Debris // *Nasa Cp 2360*. 1982. (In Engl.).
10. ESA's Annual Space Environment Report 2022 // European Space Agency Space Debris Office, Darmstadt, Germany. 2022. 120 p. URL: https://www.esa.int/Safety_Security/Space_Debris/ESA_s_Space_Environment_Report_2022 (accessed: 12.05.2022). (In Engl.).
11. Blackerby C. [et al.]. Elsa-D: an in-Orbit End-of-Life Demonstration Mission // In Proceedings of the International

Astronautical Congress, IAC. 2018. URL: <https://astroscale.com/wp-content/uploads/2018/09/ELSA-1-Conference-IAC-2018-v1.1.pdf> (accessed: 12.05.2022). (In Engl.).

12. Lappas V. J. [et al.]. RemoveDEBRIS: An EU low cost demonstration mission to test ADR technologies // *Proc. Int. Astronaut. Congr. IAC*. 2014. Vol. 3. P. 1612–1623. (In Engl.).

13. Parsonson A. ESA signs contract for first space debris removal mission // *SpaceNews*. 2020. URL: <https://spacenews.com/clearspace-contract-signed/> (accessed: 05.05.2021). (In Engl.).

14. Erwin S. U.S. Space Force would support commercial services to remove orbital debris // *SpaceNews*. 2021. URL: <https://spacenews.com/u-s-space-force-would-support-commercial-services-to-remove-orbital-debris/> (accessed: 05.05.2021). (In Engl.).

15. Brettle H. [et al.]. Towards a future debris removal service: Evolution of an ADR business model // 70th International Astronautical Congress (IAC), Washington D.C., United States, 21–25 October. 2019. 12 p. (In Engl.).

16. Kulu E. Nanosatellite Launch Forecasts — Track Record and Latest Prediction // 36th Annual Small Satellite Conference, Aug 9. 2022. P. 17. (In Engl.).

17. Kramer H. J. MEV-1 (Mission Extension Vehicle-1) and MEV-2 // *eoPortal Directory*. 2019. URL: <https://eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/m/mev-1> (accessed: 05.05.2021). (In Engl.).

18. Erwin S. Startup using Soviet-era technology to build satellite servicing vehicle // *SpaceNews*. 2021. URL: <https://spacenews.com/space-startup-using-soviet-era-technology-to-build-satellite-servicing-vehicle/> (accessed: 05.05.2021). (In Engl.).

19. Werner D. Astroscale announces 2021 Soyuz launch of ELSA-d mission // *SpaceNews*. 2020. URL: <https://spacenews.com/astroscale-elsa-d-launch-2021/> (accessed: 05.05.2021). (In Engl.).

20. CNSA Watcher, Supplemental service aircraft, (2021). URL: <https://twitter.com/CNSAWatcher/status/1436257779195555857> (accessed: 01.05. 2021). (In Engl.).

21. Felicetti L., Gasbarri P., Pisculli A., Sabatini M., Palmerini G. B. Design of robotic manipulators for orbit removal of spent launchers' stages // *Acta Astronautica*. 2016. Vol. 119. P. 118–130. DOI: 10.1016/j.actaastro.2015.11.012. (In Engl.).

22. Botta E. M. Deployment and Capture Dynamics of Tether-Nets for Active Space Debris Removal. McGill University, Montreal. 2017. (In Engl.).

23. Dudziak R., Tuttle S., Barraclough S. Harpoon technology development for the active removal of space debris // *Adv. Sp. Res.* 2015. Vol. 56. P. 509–527. DOI: 10.1016/j.asr.2015.04.012. (In Engl.).

24. Patent 2695155 Russian Federation, IPC B 64 G 1/00. Kosmicheskiy kompleks dlya utilizatsii gruppy ob"yektov krupnogabaritnogo kosmicheskogo musora [Space system for recycling large-size space debris] / Shcheglov G. A., Stogniy M. V. No. 2018145193. (In Russ.).

25. Patent 2573015 Russian Federation, IPC B 64 G 1/00. Mnogomodul'nyy kosmicheskiy apparat dlya ochistki geostatsionarnoy orbity i sposob ochistki geostatsionarnoy orbit [Multimodule spacecraft for cleaning up geostationary orbit and method of cleaning up geostationary orbit] / Leonov A. G., Efremov G. A., Shirokov P. A., Palkin M. V. No. 2014114880. (In Russ.).

26. Dalyayev I. Yu., Shardyko I. V. Maketnyy obrazets manipulyatsionnoy sistemy servisnogo kosmicheskogo apparata [Experimental model of a manipulator for on-orbit servicing spacecraft] // *Ekstremal'naya robototekhnika. Extreme Robotics.* Saint-Petersburg: AP4Print Publ., 2016. P. 411–415. (In Russ.).

27. Felicetti L., Gasbarri P., Pisculli A. [et al.]. Design of robotic manipulators for orbit removal of spent launchers' stages // *Acta Astronaut.* 2016. Vol. 119. P. 118–130. DOI: 10.1016/j.actaastro.2015.11.012. (In Engl.).

28. Schaub H., Jasper L. E. Z. Orbit Boosting Maneuvers for Two-Craft Coulomb Formations // *Journal of Guidance, Control, and Dynamics.* 2013. Vol. 36 (1). P. 74–82. DOI: 10.2514/1.57479. (In Engl.).

29. Feili D., Smirnova M., Dobkevicius M. [et al.]. Impulse Transfer Thruster for an Ion Beam Shepherd Mission. 2015. P. 1–9. (In Engl.).

30. Merino M., Ahedo E., Bombardelli C. [et al.]. Ion beam shepherd satellite for space debris removal // *Prog. Propuls. Phys.* 2013. Vol. 4. P. 789–802. DOI: 10.1051/eucass/201304789. (In Engl.).

31. Jasper L., Schaub H. Input shaped large thrust maneuver with a tethered debris object // *Acta Astronaut.* 2014. Vol. 96. P. 128–137. DOI: 10.1016/j.actaastro.2013.11.005. (In Engl.).

32. Patent 2531679 Russian Federation, IPC B 64 G1/16, B 64 G1/24. Sposob ochistki orbit ot kosmicheskogo musora [Method of clearing space debris from orbit] / Trushlyakov V. I., Makarov Yu. N., Oleynikov I. I., Shatrov Ya. T. No. 2012136161/11. (In Russ.).

33. Trushlyakov V. I., Yudintsev V. V. Rotary space tether system for active debris removal // *Journal of Guidance Control and Dynamics.* 2020. Vol. 43. P. 354–364. DOI: 10.2514/1.G004615. (In Engl.).

TRUSHLYAKOV Valeriy Ivanovich, Doctor of Technical Sciences, Professor of Aircraft and Rocket Building Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.

SPIN-code: 2910-2159

AuthorID (RSCI): 9914

ORCID: 0000-0002- 8444-6880

AuthorID (SCOPUS): 35792803600

Researcher ID: D-7270-2015

Correspondence address: vatrushlyakov@yandex.ru

YUDINTSEV Vadim Vyacheslavovich, Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, Senior Researcher at the Research Laboratory «Steam and Gas Mixtures in Launch Vehicle Designs», OmSTU, Omsk.

ORCID: 0000-0002-3244-017X

AuthorID (SCOPUS): 36676070000

ResearcherID: N-1367-2014

Correspondence address: yudintsev@gmail.com

URBANSKY Vladislav Alexandrovich, Graduate Student of Aircraft and Rocket Building Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 2487-9142

ORCID: 0000-0002-8837-7050

AuthorID (RSCI): 978934

Researcher ID: AAX-1703-2021

Correspondence address: vladurba95@gmail.com

ONISHCHUK Sergei Yurievich, Graduate Student of Aircraft and Rocket Building Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 6122-7947

AuthorID (RSCI): 979474

ORCID: 0000-0002-9641-5459

AuthorID (SCOPUS): 57211128570

Researcher ID: D-9183-2019

Correspondence address: onishchuksy@gmail.com

For citations

Trushlyakov V. I., Yudintsev V. V., Urbansky V. A., Onishchuk S. Yu. The analysis of the state of development of devices for cleaning orbits in near-Earth space from large-sized space debris objects // *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering.* 2022. Vol. 6, no. 4. P. 42–52. DOI: 10.25206/2588-0373-2022-6-4-42-52.

Received November 03, 2022.

© V. I. Trushlyakov, V. V. Yudintsev, V. A. Urbansky, S. Yu. Onishchuk