

## **Переработка техногенного космического мусора в топливо на низких орбитах**

**Баркова М.Е.**

*Российские космические системы,*

*ул. Авиамоторная, 53, Москва, 111250, Россия*

*e-mail: [Alttaira@yandex.ru](mailto:Alttaira@yandex.ru)*

***Статья поступила 29.11.2019***

### **Аннотация**

В данной работе рассмотрена переработка космического мусора в топливо на низких орбитах, которые являются наиболее засоренными. Представлен сравнительный анализ космического аппарата для утилизации космического мусора (далее СКМ – сборщик космического мусора) по сравнению с другими способами. Рассмотрены некоторые аспекты переработки космического мусора в топливо и экономическая целесообразность такого подхода.

**Ключевые слова:** космос, космический мусор, техногенный, утилизация, переработка, космический аппарат для сбора космического мусора

### **О проблеме космического мусора**

Космический мусор имеет космогенное и техногенное происхождение. Космогенным космическим мусором является «строительный» материал Солнечной системы, например, микрометеориты, межпланетная или межзвездная пыль.

Техногенный космический мусор представляет собой космические объекты (КО) искусственного происхождения различных фракций.

Техногенное засорение околоземного космического пространства (ОКП) началось на заре космической эры, с запуском первого искусственного спутника Земли 4 октября 1957 года.

На данный момент по данным каталогов космического мусора NASA, ESA, АСПОС ОКП, в ОКП наблюдается около 20000 зарегистрированных (КО) размером больше 10 см. Объекты космического мусора в ОКП создают реальную опасность высокоскоростных столкновений функционирующих аппаратов с пассивными фрагментами. Причиной досрочного разрушения объекта может стать соударение с частицей размером меньше 0.1 см со скоростью 10 км/с. Вероятность столкновения космического аппарата площадью 6 м, на высоте 900 км равна  $10^{-6}$  за 90 лет, причем прирост космического мусора составляет 6-12% в год.

В июле 1996 года, примерно на высоте 660 км, произошло первое идентифицированное столкновение отслеживаемых каталогизированных КО французского коммуникационного спутника «CERISE» и с фрагментом третьей ступени французской же ракеты «Ariane 1», запущенной ранее. Относительная скорость во время столкновения составляла около 14 км/с или 50000 км/час. Апофеозом столкновений КА с космическим мусором является разрушение КА «Iridium 33», входившего в состав одноименной сети мобильной связи, вследствие столкновения с неуправляемым КА «Космос – 2251», выведенным из эксплуатации.

В результате столкновения оба КА были полностью разрушены и образовали обломки более мелкой фракции [1].

Объекты космического мусора классифицируются по следующим категориям: мелкие (менее 5 мм), средние (от 5 мм до 10 см), крупные (более 10 см).

Наиболее засоренными орбитами является: низкие орбиты 300-400 км, 800-100 км и 1200-1500 км, солнечно-синхронные орбиты, средние орбиты, - высокоэллиптические орбиты, и геостационарная орбита.

На данный момент в качестве необходимых и практически реализуемых путей борьбы с космическим мусором могут быть предложены следующие пути:

- регистрация объектов ракетно-космической техники (РКТ) и постоянный контроль за состоянием засорения ОКП на основе сбора, обработки и анализа данных от различных источников информации, принятие мер противодействия нарастанию популяции космического мусора;

- выявление КО и событий в ОКП, несущих потенциальную угрозу возникновения опасных и чрезвычайных ситуаций в космосе и на Земле;

- оперативное баллистико-информационное сопровождение опасных ситуаций в ОКП, создаваемых неуправляемыми КО;

- уводы отработавших объектов РКТ в зоны захоронения и на орбиты с заданным ограниченным временем баллистического существования;

- активное удаление большеразмерных объектов космического мусора [1].

Существующие способы удаления космического мусора с орбиты, в основном, разделяются на способы увода космического мусора с орбиты для последующего

сгорания в атмосфере на орбиту захоронения (в случае геостационарной орбиты) и способы его уничтожения (дробления) непосредственно на орбите [2].

Каждый тип способов применим на определенных высотах орбит и не устраняет проблему космического мусора полностью. Менее известны способы защиты КА, существующие на настоящий момент на уровне концепции. Это кинетический реактивный двигатель (КРД) и переработка КМ в плазму.

Ввиду роста популяции КМ и точечного воздействия, КРД является неэффективным в экономическом плане, так как требуется создать систему КА с КРД, а также в плане наведения космического мусора на КРД и возможности разрушения двигателя обломком КМ. Переработка КМ в плазму сложно реализуема, так как требует высокой температуры и давления на борту (10000°, 10-15 атм.).

В Соединенных Штатах Америки, в частности в таких организациях, как NASA, SpaceX и Rocket Lab выполняются разработки и исследования, направленные на решения проблемы КМ путем увода его с орбиты и уничтожения лазерным лучом. Данные меры противодействия КМ имеют недостатки в плане падения на Землю не сгоревших в атмосфере обломков и образования космического мусора более мелкой фракции.

В Японии, агентством по исследованию космоса JAXA испытываются системы по поиску космического мусора, а также разрабатываются сетевые и гарпунные ловушки. Японской компанией Astroscale предложен проект небольших спутников, которые будут отлавливать КМ, и сгорать с ним в атмосфере. Данный проект имеет ряд недостатков, связанных с неполным сгоранием КМ в атмосфере и

экономической неэффективностью в плане постоянного пополнения орбитальной группировки спутников-уничтожителей [3].

В связи с этим, в данной работе предлагается уничтожение техногенного космического мусора на непосредственно орбите путем его переработки в топливо.

Таким образом, актуальность проблемы космического мусора в целом обуславливается возрастающим техногенным загрязнением околоземного пространства, что влечет за собой повреждения и выход из строя КА [4]. Актуальность данной работы состоит в использовании космического мусора в качестве рабочего тела реактивных двигателей, то есть предлагается утилизация безотходным способом.

Целью данного исследования является обоснование концепции переработки техногенного космического мусора в топливо на низких орбитах.

### **Концепция СКМ**

СКМ предназначен уничтожения миниатюрных космических аппаратов (мини-, микро-, нано-КА), например, типа CubeSat, крупных обломков КА и ступеней ракет-носителей, размером от 0,5 до 1 м, а также мелких обломков, величиной более 5-10 см, что обуславливается размером звена сети [4].

Космический аппарат для утилизации космического мусора включает в себя *ловушку* для космического мусора, выполненную в виде сети на тросах, и *систему утилизации* космического мусора в псевдожидкое топливо для двигателей КА.

Псевдожидкое топливо (или его компонент) состоит из порошкообразных веществ, которые можно флюидизировать газом по методу кипящего слоя и подавать в камеру сгорания ракетного двигателя аналогично жидкому компоненту. Сжижающим агентом может быть нейтральный газообразный азот, а также активные сжижающие газы, например, для окислителя – кислород, а для горючего – водород [5].

*Ловушка* для космического мусора состоит из деформируемых куполообразной и конусообразной сетей, связанных между собой тросами и сходящихся-расходящихся друг относительно друга с возможностью образования замкнутой полости.

*Система утилизации* космического мусора состоит из следующих компонентов: ловушка, двухвалковый измельчитель, барабанно-шаровая мельница, мембранно-электродный блок, регенератор воды, управляющее устройство, резервуар с топливом и двигатели [6].

Работа системы утилизации СКМ осуществляется согласно схеме, изображенной на рисунке 1.

На основании схемы на рисунке 1, рассмотрим работы внутренних систем СКМ. Космический мусор после захвата сетью попадает в двухвалковый

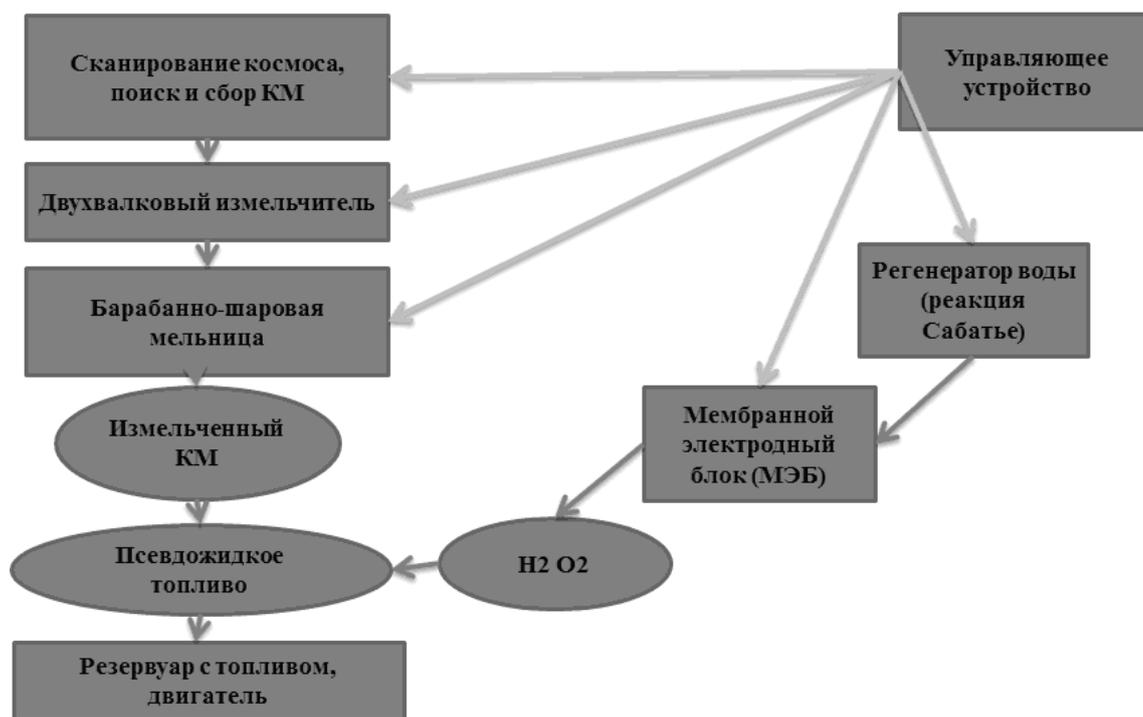


Рис. 1. Схема работы СКМ и его компоненты [6]

измельчитель, где он, охлаждаясь, дробиться. Затем измельченные обломки направляются в барабанно-шаровую мельницу, где превращаются в мелкодисперсный порошок. В качестве параллельного процесса протекает регенерация воды по реакции Сабатье. Благодаря непрерывному получению воды и электролизу мембранно-электродным блоком, получают кислород и водород.

### Некоторые технические проблемы реализации СКМ

На пути реализации СКМ встречается ряд проблем, связанных, как с самим рабочим процессом утилизации космического мусора, так и с эксплуатационной инфраструктурой. Среди них стоит выделить захват космического мусора сетью, использование тросовых систем, точность наведения на космический мусор, расход топлива СКМ при орбитальных маневрах.

*Обоснование захвата космического мусора сетью*

Захват космического мусора на орбите сетью является сложным процессом, который, в случае ошибки, может привести к поломке СКМ. Чтобы избежать этого, следует определиться с выбором материала сети, расходом топлива СКМ и точностью наведения на КО.

*Выбор материала тросовой системы*

Очевидно, что материал для создания сети СКМ должен быть легким и прочным. Надежность тросовой системы обеспечивается надежностью крепления и прочностью материала, из которого она изготовлена. На основании справочных данных, приведем в таблице 1 марки, характеристики плотности, прочности и конструкционной эффективности некоторых материалов, задействованных в космическом машиностроении [7].

Таблица 1

## Механические характеристики материалов

Материалы	Марка	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Прочность, МПа	Конструкционная эффективность, км
Алюминий(Al)	7075-T6	2.8	540	19
Титан(Ti)	6Al-4V	4.4	1080	24
Магний (Mg)	AZ31B-N24	1.8	270	15
Сталь	300M	7.8	1930	25
M5	-	1.7	570	17
Кевлар	Kevlar 49	1.4	1100	79

Spectra	-	2.3	2200	136
---------	---	-----	------	-----

Анализируя данные таблицы 1, целесообразно выбрать кевлар для изготовления тросовой системы куполообразной сети.

Рассмотрим некоторые моменты поведения тросовой системы при захвате космического мусора. Оно характеризуется максимальной скоростью выпуска троса захвате космического мусора без разрыва

$$V_{c.торм} = \sqrt{\frac{2\delta}{\rho}}, \quad (1)$$

где  $T$  - расчетная прочность на растяжение,  $\delta$  - прочность материала.

Во избежание повреждения СКМ, для подобных сближений необходимо определить скорость движения СКМ. При этом, СКМ должен пересекать орбиту космического мусора под малым углом. Эти параметры коррелируют с прочностью материала изготовления тросовой системы и корпуса КА.

На рисунке 2 представлено распределение скоростей в системе СКМ и космическом мусоре на основе [8].

Из рисунка 2 следует, что, считая известными параметры орбит СКМ и объекта космического мусора, для захвата можно провести сближение по методу свободных траекторий с помощью двух импульсов (1-й импульс – разгонный  $\Delta V_1$ , 2-й – тормозной  $\Delta V_2$ ).

$$V = (V_{СКМ} + \Delta V_1 - V_{c.торм.}) + (V_{СКМ2} + \Delta V_2) + V_{КМ}, \quad (2)$$

где  $V_{СКМ}$  - скорость СКМ,  $V_{СКМ2}$  - скорость СКМ при переходе на другую

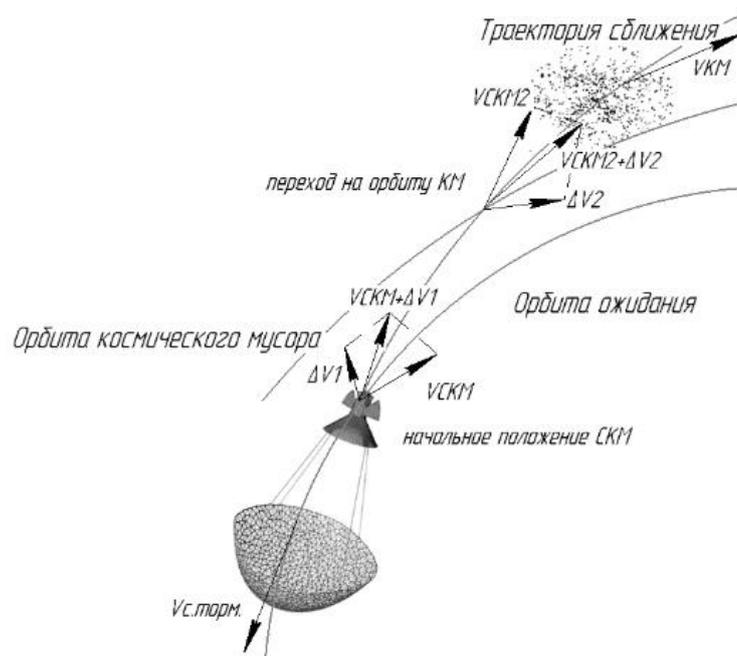


Рис. 2. Распределение скоростей

орбиту  $V_{с.торм}$  - скорость сети,  $V_{КМ}$  - скорость космического мусора.

Предположим, что  $V_{СКМ} = V_{СКМ2}$  и  $\Delta V_1 = \Delta V_2$ , тогда, с учетом формулы

Циолковского:

$$V_{СКМ} = S \cdot \ln \frac{M}{m}, \quad (3)$$

где  $S$  – скорость истечения топлива,  $M$  – масса топлива,  $m$  – масса без топлива,

и формулы (1), получаем

$$V = \left( S \cdot \ln \frac{M}{m} + \Delta V - \sqrt{\frac{2\delta}{\rho}} \right) + V_{КМ}. \quad (4)$$

*Расход топлива СКМ*

С использованием формулы Циолковского и справочных формул

$$F = Q \cdot S, \quad F = m \cdot a, \quad (5)$$

расход топлива  $Q$  получаем:

$$Q = \frac{m \cdot a}{S \cdot \ln \frac{M}{m}} \quad (6)$$

Тогда, на основании полученных формул, данные скорости и расхода топлива приведены в таблице 2 [8].

Таблица 2

Параметры скорости расхода топлива

Параметры	Характеристики
Средняя скорость СКМ на орбите, м/с	8000-11000
Средняя скорость сонаправленного космического мусора, м/с (согласно каталогу космического мусора NORAD)	7800 - 11000
Расход топлива, кг/с	4,15
Теоретическая скорость истечения топлива по Зенгеру, м/с	5640 / 5210

Из представленной таблицы 2 видно, что СКМ сможет перейти на орбиты космического мусора, захватив его сетью.

#### *Точность наведения*

На основании данных эксперимента RemoveDebris, имевшего место 16 сентября 2018, точность наведения на имитатор космического мусора составила менее 1 метра. По данным американской организации Space Surveillance Network, которая отслеживает в пространстве около 40000 различных- объектов, подсчитала,

что в ОКП находится 7600 т. Космических объектов различных фракций, движущихся со скоростью 50 000 км/ч [9].

*О безопасности функционирующих космических аппаратов при утилизации космического мусора*

Во время утилизации космического мусора необходимо иметь баллистико-навигационное обеспечение действующих космических аппаратов во избежание их уничтожения.

*Основными техническими параметрами СКМ* являются его размеры, диаметр куполообразной сети в разложенном виде, площадь солнечного коллектора, длина тросов, время переработки космического мусора в псевдожидкое топливо. Орбитальные параметры СКМ зависят от нахождения космического мусора и наименьших затрат на вывод СКМ на орбиту.

Расчеты выполнены на основе книги [10].

В таблице 3 представлены данные технических и орбитальных параметров СКМ.

Таблица 3

Данные технических и орбитальных параметров СКМ

Параметры СКМ	Характеристики
Размеры СКМ, м	Длина – 2, ширина – 1.3
Диаметр куполообразной сети, м	100
Площадь солнечного коллектора, м <sup>2</sup>	32

Длина тросов, м	60-100
Масса СКМ, т.	2.5
Максимальная масса космического мусора в сети, т.	0.5
Время переработки космического мусора в топливо, ч.	6-8
Срок службы, лет	10-12

Рассмотрев полученные данные в таблице 3, можно сделать вывод, что СКМ является спутником среднего класса и может быть выведен на орбиту ракетами-носителями типа «Протон» [4].

На настоящее время активно проводятся эксперименты по применению двигателей на псевдожидком топливе (порошкообразное металлическое горючее), существует регенератор воды на реакции Сабатье (РСЖО НЛК, "Электрон-ВМ", АО «НИИХимМаш»), имеется опыт создания космических тросовых систем («Джемини 11», США, "Трос-1» "Трос-Rapunzel", Россия) [11-18].

### **Анализ технико-экономической целесообразности СКМ**

На данном этапе решение проблемы космического мусора нет общепринятой концепции, согласно которой производится устранение космического мусора. В основном, как уже упоминалось ранее, исследования направлены на разработку способов увода космического мусора с орбиты посредством устройств или контейнеров для его сбора [4].

На основании данных национальных космических агентств NASA (США) и JAXA (Япония), а также оценочных расчетов, на рисунке 3 представлены сравнительные характеристики стоимости проектов по утилизации космического мусора [3, 13-15, 19, 20].

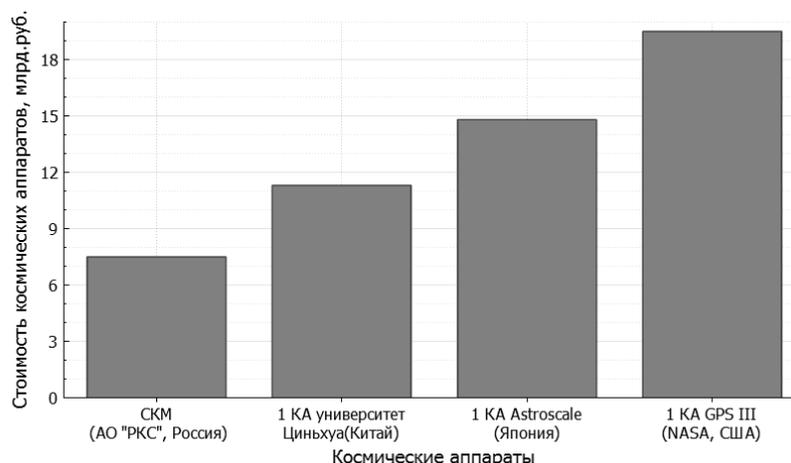


Рис 2. Стоимость космического аппарата

Реализация данных способов является нецелесообразной с экономической точки зрения, поскольку:

- после уничтожения контейнеров с КМ в атмосфере, придется создавать новые контейнеры, что влечет за собой неоправданные экономические затраты;
- реализация способов уничтожения космического мусора на орбите также является нецелесообразным, так как при уничтожении обломки могут повредить действующие КА вследствие создания космического мусора более мелкой фракции;
- СКМ не требует дополнительного топлива для функционирования и орбитального маневра;
- СКМ предназначен для решения проблемы отработавших свой срок малых КА, а также микро- и нано-КА (в частности, CubeSat).

### **О возможности технической реализации проекта и степени его готовности**

Концепция проекта СКМ защищена патентом на изобретение №2686415RU, заявкой на промышленный образец № 2019500375 от 31.01.2019 и международной заявкой на изобретение PCT/RU2019/000314 от 07.05.2019 (приоритет от 11.05.2018).

С учетом актуальности и высокой оценки проекта Госкорпорацией «Роскосмос», информационным агентством «ТАСС», информационным агентством «Региум», «Парламентская газета», новостным агентством «Рамблер», «Российская газета» и др., целесообразно создать его детальную проработку для включения в тематику исследований и проектов Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014—2020 годы».

Помимо Федеральной целевой программы представляется возможным получение поддержки проекта в виде грандов РФФИ и ФПИ.

На рисунке 4 представлена стратегия реализации проекта и степени его готовности.



Рис. 4 Стратегия развития СКМ

В связи с соответствием СКМ перечню технологий, обеспечивающих качественный прорыв в развитии приоритетных направлений космической деятельности, представляется целесообразным включение подобного направления в Федеральную космическую программу России 2016-2025 годы.

### Заключение

В связи с увеличением темпов космической деятельности человечества, проблема техногенного космического мусора будет лишь усугубляться в будущем. На данный момент среди предложенных способов решения данной проблемы имеются способы увода космического мусора с низких орбит и на орбиты захоронения, его дробление, а также использование космического мусора, как рабочего тела в плазменных и кинетических реактивных двигателях [20, 21].

В силу, недостатков данных технологий, связанных, как с не эффективностью, так и со сложной реализацией, в данной работе предлагается создание технологии утилизации космического мусора посредством его переработки в псевдожидкое

топливо. Оно представляет собой смесь мелкодисперсного порошка и газовой среды. Система переработки космического мусора СКМ состоит из последовательно расположенных в корпусе двухвалкового измельчителя, барабанно-шаровой мельницы, мембранно-электродного блока и регенератора воды.

Ловушка выполнена в виде кевларовой сети. Мощность СКМ составляет 7-8 кВт. СКМ выводится на орбиту низкую орбиту на стартовую высоту 400-450 км, где находится скопление космического мусора, а затем, получив энергию, поднимается выше. Данный проект является целесообразным с экономической точки зрения, поскольку для его функционирования не требуется дополнительного топлива, контейнеров для сбора мусора.

В качестве перспективы развития СКМ может выступить научно-исследовательская работа.

### **Библиографический список**

1. Алешин В.И. и др. Мониторинг техногенного засорения околоземного пространства и предупреждение об опасных ситуациях, создаваемых космическим мусором. – М.: ЦНИИмаш, 2015. – 244 с.
2. Michael W. Taylor. Orbital Debris: Technical and Legal Issues and Solutions, Institute of Air and Space Law, Montreal, 2006, 120 p.
3. Liou Jer-Chyi, Matney Mark J., Anz-Meador Phillip D., Kessler Donald, Jansen Mark, Theall Jeffery R. The New NASA Orbital Debris Engineering Model ORDEM2000,

NASA/TP-2002-210780, S-890, NAS 1.60:210780. May 01, 2002. p. 86. URL:

<https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20020051085.pdf>

4. Баркова М.Е. Космический аппарат для утилизации космического мусора в околоземном пространстве // Труды МАИ. 2018. № 103. URL:

<http://trudymai.ru/published.php?ID=100712>

5. Попов В.Г., Ярославцев Н.Л. Жидкостные ракетные двигатели. - М.: МАТИ, 2001. – 171 с.

6. Баркова М.Е. Космический аппарат для утилизации космического мусора. Патент № 2686415 РФ. Бюлл. № 12, 25.04.2019.

7. Арзамасов Б.Н. Соловьева Т.В., Герасимов С.А. Справочник по конструкционным материалам. – М.: МГТУ им. Баумана, 2005. - 649 с.

8. Суханов А.А. Астродинамика. - М.: ИКИ РАН, 2010. - 204 с.

9. Shin-Ichiro Nishida, Naohiko Kikuchi. A Scenario and technologies for Space Debris, 2014, URL:

<https://pdfs.semanticscholar.org/1404/8fabe2b16911e5f183d1125a662a6ff9ac9b.pdf>

10. Никольский В.В. Проектирование космических аппаратов. – СПб: Балтийский государственный технический университет, 2003. - 80 с.

11. Егоров А.Г., Тизилов А.С. Перспективы и проблемы создания двигательных и энергетических установок на порошкообразном металлическом горючем // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2011. № 3 (27). С. 277 - 281.

12. Пикалов Р.С., Юдинцев В.В. Обзор и выбор средств увода крупногабаритного космического мусора // Труды МАИ. 2018. № 100. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=93299>
13. Adimurthy V., Ganeshan A.S. Space debris mitigation measures in India // Acta Astronautica, 2006, vol. 58, issue 3, pp. 168 – 174. DOI: [10.1016/j.actaastro.2005.09.002](https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2005.09.002)
14. Ram Jakhu. Legal Issues of Satellite Telecommunications, The Geostationary Orbit, and Space Debris // Astropolitics, 2007, vol. 5 (2), pp. 173 – 208. DOI: [10.1080/14777620701580828](https://doi.org/10.1080/14777620701580828)
15. Marco M.Castronuovo. Active space debris removal - A preliminary mission analysis and design // Acta Astronautica, 2011, vol. 69, issue 9 -10, pp. 848 - 859. DOI: [10.1016/j.actaastro.2011.04.017](https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2011.04.017)
16. Авдеев А.В., Метельников А.А. Бортовая лазерная установка для борьбы с космическим мусором // Труды МАИ. 2016. № 89. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=72840>
17. Ашурбейли И.Р., Лаговьер А.И., Игнатъев А.Б., Назаренко А.В. Возможности использования авиационной лазерной системы для борьбы с космическим мусором и поддержания орбит космического аппарата // Труды МАИ. 2011. № 43. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=24856>
18. Авдеев А.В. К вопросу борьбы с космическим мусором с помощью лазерной космической установки на основе HF-НХЛ // Труды МАИ. 2012. № 61. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=35496>

19. Shin-Ichiro Nishida, Satomi Kawamoto, Yasushi Okawa, Fuyuto Terui, Shoji Kitamura. Space debris removal system using a small satellite // Acta Astronautica, 2009, vol. 65, issue 1–2, pp. 95 - 102. [DOI:org/10.1016/j.actaastro.2009.01.041](https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2009.01.041)
20. Zhang Yulin, Wang Zhaokui. Space Traffic Safety Management and Control // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015, vol. 17 (4), pp. 1 - 4. DOI: 10.1109/TITS.2015.2494686
21. Schildknecht T., Musci R., Flohrer T. Properties of the high area-to-mass ratio space debris population at high altitudes // Advances in Space Research, 2008, vol. 41, issue 7, pp. 1039 - 1045. [DOI: org/10.1016/j.asr.2007.01.045](https://doi.org/10.1016/j.asr.2007.01.045)