

# **ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА**

---

УДК 629.78

*Дронь Н.М., д-р. техн. наук; Хорольский П.Г., канд. техн. наук;  
Дубовик Л.Г., Безуглый В.А.*

## **ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ОЧИСТКИ НИЗКИХ ОКОЛОЗЕМНЫХ ОРБИТ ОТ МЕЛКОГО КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА ПРИ ОТДЕЛЬНОМ ЗАПУСКЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ЕГО УЛАВЛИВАНИЯ**

**Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными и практическими заданиями.** На сегодняшний день загрязнение околоземного пространства мелким космическим мусором (КМ), количество которого постоянного растет, является серьезной проблемой для ведения человеком космической деятельности. Несмотря на небольшие размеры (до 10 см), мелкий КМ при столкновении с действующим космическим объектом может частично или полностью вывести его из строя. Затруднена также его диагностика и маневр по уходу космического аппарата от столкновения. В связи с этим существует необходимость удаления мелкого космического мусора из околоземного пространства, в том числе с низких орбит.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Как один из методов решения задачи сбора мелкого мусора с низких орбит можно рассматривать применение космических тральщиков (КТ), снабженных двигательной установкой (ДУ) и имеющих на своем борту специальное улавливающее устройство (УУ) [1]. УУ может быть выполнено в виде полой сферы, способной складываться под обтекателем ракеты-носителя (РН), с помощью которой осуществляется выведение космического тральщика на требуемую орбиту. При маневрировании такого КТ между орбитами в результате взаимодействия мелкого КМ с УУ часть космического мусора улавливается им, а оставшаяся часть теряет орбитальную скорость и затем, как КТ, сгорает в плотных слоях атмосферы.

Целевая эффективность данного метода определяется площадью поперечного сечения УУ и временем пребывания космического тральщика в зоне возможного контакта с КМ, длительность которого зависит от типа используемой на этапе очистки ДУ и от запаса топлива.

Увеличить время контакта КТ с космическим мусором, а, следовательно, и эффективность очистки, можно применением на этом этапе двигательных установок на базе ракетных двигателей малой тяги и путем отдельного выведения КТ и УУ на рабочую орбиту двумя РН. Ракетные двигатели малой тяги обеспечат длительное время работы КТ между орбитами [2], а освободившаяся в КТ значительная масса УУ (до нескольких тонн) может быть компенсирована за счет дополнительной массы топлива.

Кроме этого, поскольку эффективность очистки околоземного пространства предлагаемым способом также зависит от площади поперечного сечения улавливающего устройства, то при известной фигуре УУ имеет место стремление к увеличению как его массы, так и массы КТ в целом. Выведение на требуемую орбиту объекта максимально возможной массы, определяемой грузоподъемностью РН, может быть обеспечено выбором способа выведения и типа ДУ для его осуществления, поэтому целесооб-

разно рассмотреть возможные варианты раздельного выведения КТ и УУ на требуемую орбиту, а также варианты их функционирования в межорбитальном пространстве.

**Целью** данной работы является оценка эффективности очистки околоземного пространства от мелкого космического мусора при раздельном выведении космического тральщика и сферического улавливающего устройства для разных способов выведения тральщика на требуемую орбиту и разных вариантов сочетаний типов используемых двигательных установок.

Выведение улавливающего устройства при этом осуществляется двигателем верхней ступени РН непосредственно на требуемую орбиту.

**Изложение основного материала исследований.** Предполагается, что КТ и УУ маневрируют между орбитами высотой 1200 и 500 км. С помощью РН одним из существующих способов космический тральщик выводится на рабочую орбиту высотой 1200 км. Здесь он стыкуется с улавливающим устройством, ранее выведенным другой РН, и после включения тормозной двигательной установки, входящей в состав КТ, снижается вместе с УУ, захватывая оказавшиеся на его пути элементы космического мусора. По достижении конечной орбиты высотой 500 км тормозная ДУ отключается, а включается разгонная ДУ, также входящая в состав КТ. Космический тральщик с УУ поднимается до начальной орбиты высотой 1200 км, разгонная ДУ выключается, включается тормозная ДУ и процесс очистки повторяется. Циклическое движение КТ вместе с УУ происходит до выработки топлива ДУ при условии обязательного выхода на конечную орбиту высотой 500 км.

Для решения поставленной задачи были рассмотрены следующие варианты выведения космического тральщика на требуемую орбиту и функционирования на этапе очистки:

- вариант 1 – вывод КТ с помощью РН на промежуточную орбиту высотой 200 км, довыведение его на требуемую рабочую орбиту 1200 км посредством разгонного блока (РБ) с жидкостной ракетной двигательной установкой (ЖРДУ) большой тяги, затем спуск вместе с УУ на орбиту высотой 500 км и последующий подъем с УУ на орбиту высотой 1200 км с помощью электроракетной двигательной установки (ЭРДУ);

- вариант 2 – вывод КТ двигателем верхней ступени РН непосредственно на орбиту 1200 км, спуск с УУ на орбиту высотой 500 км – подъем с УУ на орбиту высотой 1200 км с помощью ЭРДУ;

- вариант 3 – вывод КТ с помощью РН на промежуточную орбиту высотой 200 км, довыведение на требуемую орбиту 1200 км посредством РБ с ЭРДУ, спуск с УУ на орбиту высотой 500 км – подъем с УУ на орбиту высотой 1200 км с помощью ЭРДУ;

- вариант 4 – вывод КТ с помощью РН на промежуточную орбиту высотой 200 км, довыведение на орбиту высотой 1200 км с помощью разгонного ЖРД малой тяги (ЖРДМТ), спуск с УУ на орбиту высотой 500 км – подъем с УУ на орбиту высотой 1200 км с помощью ЭРДУ;

- вариант 5 – вывод КТ с помощью РН на промежуточную орбиту высотой 200 км, довыведение на орбиту высотой 1200 км с помощью разгонного ЖРДМТ, спуск с УУ на орбиту высотой 500 км – подъем с УУ на орбиту высотой 1200 км также с помощью ЖРДМТ.

В вариантах 1, 3 разгонный блок от КТ не отделяется, чтобы не добавлять в космосе крупногабаритного КМ, его пассивная масса после выработки топлива ДУ учитывается при спуске или подъеме КТ с УУ.

Для каждого из рассмотренных вариантов вычислялось число циклов «спуск-подъем»  $n$ , которое может совершить КТ с УУ при соответствующем запасе топлива, рассчитанном для случая раздельного выведения космического тральщика и улавливающего устройства, и суммарном времени работы на этапе очистки.

Запас рабочего тела ЭРДУ (варианты 1-4) или запас топлива ЖРДМТ (вариант 5), необходимый на спуск КТ вместе с УУ с орбиты высотой 1200 км на орбиту высотой 500 км или подъем обратно, определялся по формуле:

$$M_{T_n} = \tilde{M}_{\Sigma} \left( 1 - \frac{1}{e^{W/J_{y\delta}}} \right),$$

где  $M_{T_n}$  – запас топлива, необходимый на спуск или подъем КТ с УУ;  $\tilde{M}_{\Sigma}$  – суммарная масса космического тральщика и улавливающего устройства при спуске или подъеме;  $W$  – характеристическая скорость перехода с орбиты высотой 1200 км на орбиту высотой 500 км и обратно;  $J_{y\delta}$  – удельный импульс ЭРД или ЖРДМТ;

$$W = V_0 \cdot \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{\bar{r}_k}} \right),$$

где  $V_0$  – круговая скорость тральщика на рабочей орбите [3];  $\bar{r}_k$  – отношение радиусов высокой и низкой орбит.

В первом цикле движения при спуске на орбиту высотой 500 км  $\tilde{M}_{\Sigma}$  – начальная суммарная масса космического тральщика, включая массу разгонного блока (в случае его использования), и улавливающего устройства.

Масса КТ  $M_{КТ}$  для первого варианта его выведения определялась из выражения

$$M_{КТ} = M_0 - M_{T_{ЖРД}} - M_{РБ_{сх}},$$

где  $M_0$  – грузоподъемность РН на круговой орбите высотой 200 км;  $M_{T_{ЖРД}}$  – запас топлива ЖРД, расходуемого на переход с орбиты высотой 200 км на орбиту высотой 1200 км;  $M_{РБ_{сх}}$  – масса обтекателя и сухая масса РБ.

Во втором варианте для определения массы КТ на орбите 1200 км использовались справочные данные, приведенные в [4], при предположении, что в идеальном случае масса КТ равна грузоподъемности РН на высоте 1200 км.

В третьем варианте при использовании ЭРДУ для перевода КТ на орбиту высотой 1200 км масса космического тральщика находилась из уравнения

$$M_{КТ} = M_0 - M_{РТ_{ЭРД}} - M_{РБ_{сх}},$$

где  $M_{РТ_{ЭРД}}$  – запас топлива ЭРД для перевода КТ с орбиты 200 км на орбиту высотой 1200 км;  $M_{РБ_{сх}}$  – сухая масса разгонного блока, включающая массу конструкции разгонной ЭРДУ и массу системы электропитания.

В четвертом и пятом вариантах с применением ЖРДМТ масса КТ рассчитывалась с использованием выражения

$$M_{KT} = M_0 - M_{T_{ЖРДМТ}},$$

где  $M_{T_{ЖРДМТ}}$  – запас топлива ЖРДМТ, расходуемого на переход с орбиты высотой 200 км на орбиту высотой 1200 км.

Во всех вариантах запас топлива, необходимого на выведение КТ на требуемую орбиту, вычислялся согласно методике, изложенной в [3].

Масса улавливающего устройства  $M_{УУ}$  для принятого способа выведения его на требуемую орбиту определялась грузоподъемностью используемых ракет-носителей на орбите высотой 1200 км [4].

При подъеме и в каждом последующем цикле  $\tilde{M}_\Sigma$  уменьшалась за счет обработки рабочего тела ЭРДУ или топлива ЖРДМТ. Остающийся запас топлива  $M_T$  для следующих циклов движения определялся из уравнения баланса массы космического тральщика  $M_{КТ}$  [3] при отсутствии массы полезной нагрузки.

$$M_T = M_{КТ} - M_{СПУ} - M_D - M_{СА} - M_{ЭУ} - M_{СХИТ} - M_K,$$

где  $M_{СПУ}$  – масса системы преобразования и управления;  $M_D$  – масса двигателей;  $M_{СА}$  – масса служебной аппаратуры;  $M_{ЭУ}$  – масса энергоустановки (в случае ее наличия);  $M_{СХИТ}$  – масса системы хранения и подачи топлива;  $M_K$  – масса конструкции тральщика.

Число циклов движения КТ рассчитывалось из условия достижения количества оставшегося топлива, недостаточного для совершения следующего полного цикла.

Полученное число циклов  $n$  использовалось для вычисления площади собирающей поверхности улавливающего устройства  $F$ :

$$F = 4\pi R_{УУ}^2 n,$$

где  $R_{УУ}$  – радиус улавливающего устройства;

$$R_{УУ} = \sqrt{M_{УУ} / 4\pi\delta},$$

где  $\delta$  – плотность оболочки сферы.

Суммарное время работы КТ складывалось из времени спуска КТ с орбиты высотой 1200 км на орбиту высотой 500 км в первом цикле и времени на обратный подъем-спуск в каждом последующем.

Число циклов  $n$ , которое может совершить космический тральщик в результате выполнения данного маневра и суммарное время  $T$ , необходимое на его осуществление, для предложенных вариантов выведения и функционирования КТ приведены в таблице. Здесь также приведены максимально возможные радиусы улавливающих устройств  $R_{УУ}$ , определяемые грузоподъемностью  $M_0$  рассмотренных для их выведения ракет-носителей.

Число циклов и время работы КТ на этапе очистки при раздельном выведении КТ и УУ

РН	$M_0$ , т	$R_{УУ}$ , м	Варианты									
			1		2		3		4		5	
			$n$	$T$ , год	$n$	$T$ , год	$n$	$T$ , год	$n$	$T$ , год	$n$	$T$ , ч
Циклон-3	4,0	30	17	1,3	9	0,6	21	1,5	17	1,1	3	10
Argan-42L	7,3	38	27	3,0	15	1,4	31	3,6	25	2,8	3	18
Зенит-2	13,0	41	37	5,9	17	1,7	43	7,3	35	5,5	3	28
Delta-4H	24,0	41	53	12,0	17	1,7	57	14	51	11,4	3	94

Как видно из таблицы, для первого, третьего и четвертого вариантов число совершаемых КТ с УУ циклов движения увеличивается с ростом грузоподъемности РН. Для второго варианта число циклов также увеличивается для РН небольшой грузоподъемности («Циклон-3», «Argan-42L») и остается постоянным для РН «Зенит-2» и «Delta-4H». Последнее объясняется тем, что справочные данные [4], используемые для вычисления массы КТ и массы УУ, выводимых этими РН, практически не отличаются. В варианте использования ЖРДМТ число совершаемых КТ с УУ циклов не зависит от радиуса УУ и может быть увеличено лишь применением мощной РН. Время работы КТ на этапе очистки увеличивается с ростом грузоподъемности РН для всех рассмотренных вариантов.

Из приведенного ниже рисунка следует, что с увеличением грузоподъемности РН увеличивается и площадь собирающей поверхности УУ.

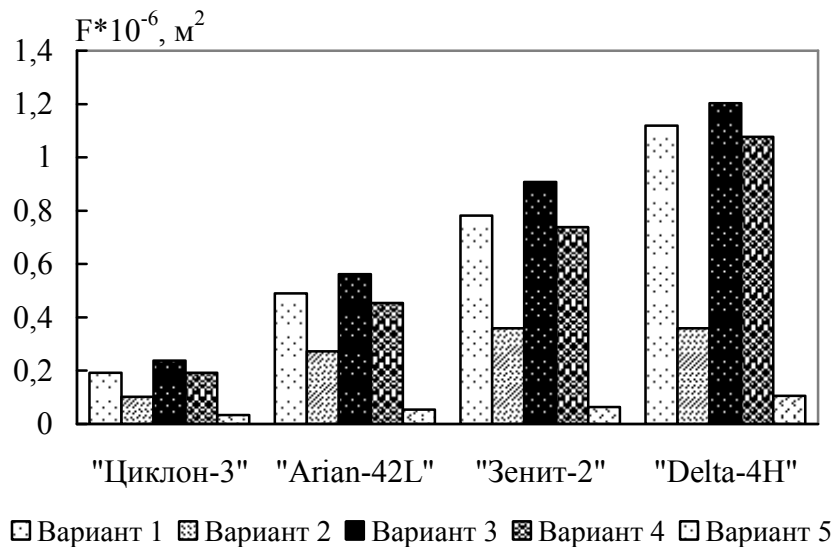


Рис. Площадь собирающей поверхности УУ

Таким образом, анализируя полученные результаты, можно сделать следующие **выводы**.

1. Для рассмотренных способов выведения космического тральщика на требуемую орбиту и предложенных вариантов сочетаний типов двигательных установок на этапах его выведения и функционирования эффективность маневра очистки низких околоземных орбит от мелкого космического мусора при отдельном запуске улавли-

ваючого устройства увеличивается с ростом грузоподъемности используемой ракеты-носителя.

2. При непосредственном выведении улавливающего устройства на требуемую орбиту двигателем верхней ступени РН наиболее эффективным способом выведения космического тральщика является способ довыведения его с промежуточной орбиты посредством разгонного блока с ЖРД или ЭРДУ.

3. Наибольшая площадь собирающей поверхности улавливающего устройства и наибольшее время его контакта с космическим мусором могут быть достигнуты при использовании на этапах выведения и снижения КТ электроракетной двигательной установки. Однако из-за слишком большого времени, необходимого на выведение КТ с помощью ЭРДУ, целесообразнее использовать вариант выведения КТ посредством разгонного блока с ЖРД и спуска с ЭРДУ. Вариант использования ЖРДМТ для данного маневра очистки является малоэффективным.

Предметом дальнейших исследований могут быть другие варианты выведения улавливающего устройства в сочетании с рассмотренными вариантами выведения и функционирования космического тральщика, а также сравнительная оценка эффективности очистки низких орбит при выведении УУ в составе КТ и автономно.

**Литература:** 1. Дронь Н.М. Космический тральщик для очистки околоземного пространства от космического мусора / Н.М. Дронь, А.И. Кондратьев, П.Г. Хорольский, Л.Г. Дубовик // Збірник доповідей учасників шостої всеукраїнської науково-практичної конференції «Інноваційний потенціал української науки – XXI сторіччя» (1-15 квітня 2010 р.). – 2010. – Запоріжжя: Вид-во ПГА. – С.134-136. 2. Кондратьев А. И. Оценка характеристик мусорособирающих космических аппаратов с ЭРДУ для улавливания космического мусора / А. И. Кондратьев, П. Г. Хорольский, Л. Г. Дубовик // Авиационно-космическая техника и технология. – Х.: "ХАИ", 2009. – № 9 (66). – С. 45–47. 3. Кондратьев А.И. Методика расчета тяговых и энергомассовых характеристик мусорособирающего космического аппарата с электродвигательной установкой / А.И. Кондратьев, П.Г. Хорольский, Л.Г. Дубовик // Авиационно-космическая техника и технология. – Х.: "ХАИ", 2009. – № 10 (67). – С. 82-84. 4. Isakowitz S.J. International Reference Guide to Space Launch Systems. Second Edition / S.J. Isakowitz.– Washington: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1991. – 341 p.

**Bibliography (transliterated):** 1. Dron' N.M. Kosmicheskij tral'wik dlja ochistki okolozemnogo prostranstva ot kosmicheskogo musora / N.M. Dron', A.I. Kondrat'ev, P.G. Horol'skij, L.G. Dubovik // Zbirnik dopovidej uchasnikiv shostoї vseukraїns'koї naukovo-praktichnoї konferencії «Innovacijnij potencial ukraїns'koї nauki – XXI storichchja» (1-15 kvitnja 2010 r.). – 2010. – Zaporizhzhja: Vid-vo PGA. – S.134-136. 2. Kondrat'ev A. I. Ocenka harakteristik musorosobirajuwih kosmicheskijh apparatov s JeRDU dlja ulavlivanija kosmicheskogo musora / A. I. Kondrat'ev, P. G. Horol'skij, L. G. Dubovik // Aviacion-no-kosmicheskaja tehnik i tehnologija. – H.: "HAI", 2009. – № 9 (66). – S. 45–47. 3. Kondrat'ev A.I. Metodika rascheta tjugovyh i jenergomassovyh harakteristik muso-rosobirajuwego kosmicheskogo apparata s jelektrodvigatel'noj ustanovkoj / A.I. Kondrat'ev, P.G. Horol'skij, L.G. Dubovik // Aviacionno-kosmicheskaja tehnik i tehnologija. – H.: "HAI", 2009. – № 10 (67). – S. 82-84. 4. Isakowitz S.J. International Reference Guide to Space Launch Systems. Second Edition / S.J. Isakowitz.– Washington: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1991. – 341 p.

Дронь М.М., Хорольський П.Г., Дубовик Л.Г., Безуглий В.А.

**ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ОЧИЩЕННЯ НИЗЬКИХ НАВКОЛОЗЕМНИХ  
ОРБИТ ВІД ДРІБНОГО КОСМІЧНОГО СМІТТЯ ПРИ АВТОНОМНОМУ  
СТАРТІ ПРИСТРОЮ ДЛЯ ЙОГО УЛОВЛЮВАННЯ**

Розглянуто ефективність очищення навколоземного простору від дрібного космічного сміття при окремому виведенні космічного тральщика і сферичного уловлювального пристрою для різних способів виведення кожного з них.

Dron N., Horolsky P., Dubovik L., Bezugly V.

**EFFICIENCY OF CLEARING OF THE LOW EARTH  
ORBITS FROM SMALL SPACE DEBRIS AT THE INDEPENDENT  
START OF THE DEVICE FOR ITS CATCHING**

Efficiency of clearing earth space from small space debris is considered at separate injection of a space trawler and the spherical catching device for different ways injection of each of them.

---

УДК 534.1:531.44

*Ковтун А.В., канд. техн. наук*

**ОБ ИЗМЕНЕНИИ РЕЗОНАНСНЫХ ЧАСТОТ КОЛЕБАНИЙ МЕХАНИЧЕСКИХ  
СИСТЕМ ПРИ НАЛИЧИИ ТРЕНИЯ**

**Введение.** Одной из проблем, стоящих перед современной наукой, является обеспечение надежности машин [1,4]. Среди многих явлений, приводящих к эксплуатационным повреждениям узлов и деталей машин, наиболее опасными являются трение, износ и динамическая усталость. В первую очередь, это относится к механическим системам, элементы которых связаны между собой силами сухого трения. Такие системы широко распространены в технике, особенно в узлах контактирования элементов с трением [2]. Если контакт тела с контр телом происходит по противоположным поверхностям (назовем такие конструкции вложенными), то это приводит к возникновению новых эффектов, учет которых необходим для обеспечения повышенной надежности машин.

Известно, что реальная механическая система имеет бесконечно большое число степеней свободы. Однако, при решении практических задач обычно пользуются упрощёнными схемами, которые характеризуются конечным числом степеней свободы. В таких расчётных схемах некоторые (наиболее лёгкие) части системы считаются вовсе лишёнными массы и представляются в виде деформируемых безинерционных связей, при этом тела, за которыми в расчётной схеме сохраняется свойство инерции, считаются материальными точками [1]. Изучение колебаний механических систем на таких моделях позволяет получить основные закономерности влияния интересующих факторов на динамические характеристики системы.

Особое место в теории колебаний отводится исследованиям вопроса взаимодействия сил трения, действующих в системе, и вынужденных колебаний. При этом этот вопрос дискутируется в основном в двух аспектах: трение как источник автоколебаний и колебания – механизм управляющий трением. В результате, не уделяется внимание вопросу влияния сил трения на величину частоты резонансных колебаний механических систем. Это связано, возможно, с тем, что этот вопрос считается решённым. Однако выделение класса вложенных конструкций (среди нелинейных механических систем) требует некоторых уточнений.