

УДК 629.78

**Н. М. Дронь, П. Г. Хорольский, Л. Г. Дубовик**

*Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара*

## **СРАВНИТЕЛЬНАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОДНОГО МАНЕВРА КОСМИЧЕСКОГО ТРАЛЬЩИКА ПРИ ОЧИСТКЕ ОКОЛОЗЕМНОГО ПРОСТРАНСТВА ОТ МЕЛКОГО КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА**

**Розглянуто порівняльну ефективність роботи космічного тральщика, що використовує декілька пристроїв для уловлювання дрібного космічного сміття, по чергово знімаючи їх з вихідної орбіти, на яку вони запускаються різними способами окремо від тральщика.**

**Ключові слова:** космічне сміття, космічний тральщик, уловлювальний пристрій, спосіб виведення, навколоземний простір.

**Рассмотрена сравнительная эффективность работы космического тральщика, использующего несколько устройств для улавливания мелкого космического мусора, поочередно снимая их с исходной орбиты, на которую они запускаются разными способами отдельно от тральщика.**

**Ключевые слова:** космический мусор, космический тральщик, улавливающее устройство, способ выведения, околоземное пространство.

**The comparative efficiency of a space trawler using some devices for catching of small space debris, serially removing them from an initial orbit on which they are started up in the different ways separately from trawler is considered.**

**Key words:** space debris, space trawler, catching device, a way of injection, earth space.

**Введение.** Техногенное загрязнение околоземного космического пространства является серьезной проблемой современной космонавтики. Согласно последним данным вокруг Земли обращается свыше 150 тыс. объектов, в том числе отработавшие спутники, ступени ракет, разгонные блоки и их обломки. Число объектов меньше 1 см превышает десятки миллионов. Несмотря на малые размеры, частицы мелкого космического мусора, движущиеся с огромными скоростями, представляют большую опасность для функционирования космических аппаратов и орбитальных станций, поскольку при столкновении с ними способны нанести повреждения и вызвать сбой в работе. В связи с этим разработка способов очистки околоземного пространства от мелкого космического мусора является весьма важной и актуальной задачей.

Одним из методов ее решения можно рассматривать применение космических тральщиков (КТ), использующих двигательные установки (ДУ) для маневрирования и специальное устройство для улавливания мелких частиц космического мусора. Такой тральщик с помощью ракеты-носителя (РН) выводится на требуемую рабочую орбиту, а затем в результате выполнения соответствующего маневра в зоне очистки входит в плотные слои атмосферы, тормозится и сгорает в ней под действием сил аэродинамического сопротивления.

В работах [1–3] при совместном выведении КТ и сферического улавливающего устройства (УУ) рассмотрен маневр одноразового перехода космического тральщика с высокой орбиты на низкую за счет работы тормозной ДУ, входящей в его состав. Также для совместного выведения КТ и УУ в работе [4] приведена оценка эффективности другого маневра очистки околоземного пространства – циклического движения КТ между высокой и низкой орбитами, продолжающегося до окончательной выработки топлива входящих в его состав тормозной и разгонной ДУ. Маневр циклического движения КТ с УУ при раздельном их выведении на исходную

орбиту, описан в работе [5]. Во всех случаях в качестве критерия эффективности рассмотрена максимально возможная площадь собирающей поверхности улавливающего устройства, пересекающей пространство между высокой и низкой орбитами за время моторного полета космического тральщика на этапе очистки.

Представляет интерес маневр космического тральщика с несколькими улавливающими устройствами, выводимыми отдельно от КТ, которые он поочередно снимает с исходной орбиты.

**Постановка задачи.** Рассматривается наиболее засоренный космическим мусором пояс околоземного пространства в диапазоне высот от 500 до 1200 км [7], очистку которого предлагается провести следующим образом.

На орбиту высотой 1200 км выводятся УУ массой, соответствующей грузоподъемности используемой ракеты-носителя (РН). Затем отдельной РН такого же типа выводится космический тральщик. Пристыковавшись к одному из УУ, тральщик за счет включения имеющейся на его борту тормозной двигательной установки снижается вместе с УУ до орбиты высотой 500 км, захватывая при этом частицы космического мусора или уменьшая их скорость. На этой высоте тормозная ДУ отключается и осуществляется расстыковка КТ и УУ. Отделившееся улавливающее устройство впоследствии сгорает в плотных слоях атмосферы вместе с захваченными и потерявшими скорость мелкими частицами мусора, а космический тральщик входящей в его состав разгонной ДУ снова поднимается до исходной орбиты. Здесь он стыкуется со следующим УУ и опять опускается на низкую орбиту. Процесс спуска-подъема КТ со съемом очередного УУ с высокой орбиты продолжается до полной выработки топлива ДУ из расчета обязательного выхода космического тральщика на низкую орбиту, с которой он продолжает пассивное движение до полного прекращения своего существования.

Целью данной работы является оценка сравнительной эффективности работы космического тральщика при раздельном запуске КТ и нескольких УУ, которые он поочередно снимает с исходной орбиты, для разных способов выведения КТ и УУ и использования разных типов двигательных установок на этапах их выведения и функционирования.

Все используемые орбиты принимаются круговыми, форма улавливающего устройства – сферическая.

**Методика исследований.** Для выведения КТ на требуемую орбиту и функционирования на этапе очистки рассматривались следующие варианты:

– вариант 1 – вывод КТ с помощью РН на промежуточную орбиту высотой 200 км, довыведение его на требуемую орбиту разгонным блоком (РБ) с жидкостной ракетной двигательной установкой (ЖРДУ) большой тяги, спуск КТ с УУ – подъем КТ без УУ с помощью электроракетной двигательной установки (ЭРДУ);

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

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

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

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

Полагалось, что запуск УУ на исходную орбиту также может осуществляться двумя способами:

– с промежуточной орбиты высотой 200 км посредством разгонного блока, оснащенного либо ЖРДУ большой тяги, либо ЭРДУ, либо разгонным ЖРДМТ;

– непосредственно на требуемую орбиту двигателем верхней ступени РН.

Для каждого из рассмотренных вариантов вычислялось число спусков, которое может совершить на этапе очистки КТ с УУ при имеющемся запасе топлива, и суммарное время моторного полета комического тральщика на этом этапе. Число спусков КТ определялось по достижению количества топлива, недостаточного для совершения следующего цикла подъема-спуска. Запас топлива  $M_T$ , имеющийся на КТ, определялся из уравнения баланса массы космического тральщика  $M_{КТ}$  [6] при отсутствии массы полезной нагрузки. Запас топлива, необходимый на спуск КТ вместе с УУ с орбиты высотой 1200 км на орбиту высотой 500 км, определялся по формуле:

$$M_{Tc} = \tilde{M}_c \left( 1 - \frac{1}{e^{W/J_{y\partial}}} \right), \quad (1)$$

где  $M_{Tc}$  – запас топлива, необходимый на спуск КТ с УУ;  $\tilde{M}_c$  – суммарная масса космического тральщика и улавливающего устройства при спуске, включающая при первом спуске массу разгонного блока (в случае его использования) и уменьшающаяся с каждым последующим спуском на величину выработки рабочего тела ЭРДУ или топлива ЖРДМТ;  $W = [W_{\text{ЭРД}}; W_{\text{ЖРДМТ}}]$  – характеристическая скорость перехода КТ с орбиты высотой 1200 км на орбиту высотой 500 км и обратно с помощью ЭРД или ЖРДМТ [6];  $J_{y\partial}$  – удельный импульс ЭРД или ЖРДМТ.

Запас топлива  $M_{Tn}$ , необходимый на подъем КТ без УУ на исходную орбиту высотой 1200 км, рассчитывался по формуле:

$$M_{Tn} = \tilde{M}_n \left( 1 - \frac{1}{e^{W/J_{y\partial}}} \right), \quad (2)$$

где  $\tilde{M}_n$  – масса КТ (без УУ) при подъеме, уменьшающаяся с каждым разом на величину массы выработанного топлива.

Масса КТ и масса УУ, выводимых на требуемую орбиту посредством РБ с ЖРДУ большой тяги, определялись из выражения

$$M_{КТ,УУ} = M_0 - M_{T_{ЖРД}} - M_{РБ_{сух}}, \quad (3)$$

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;  $M_{РБ_{сух}}$  – сухая масса РБ.

Для определения массы КТ и массы УУ на высоте 1200 км при непосредственном их выведении на требуемую орбиту использовались справочные данные, приведенные в [8], при предположении, что в идеальном случае масса КТ и масса УУ равна грузоподъемности РН на этой высоте.

При использовании ЭРДУ для перевода КТ и УУ на орбиту высотой 1200 км масса космического тральщика и масса улавливающего устройства находились из уравнения

$$M_{КТ,УУ} = M_0 - M_{PT_{\text{ЭРД}}} - M_{РБ_{сух}}, \quad (4)$$

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

Для случая применения ЖРДМТ масса КТ и масса УУ рассчитывались с использованием выражения

$$M_{КТ,УУ} = M_0 - M_{T_{ЖРДМТ}}, \quad (5)$$

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

Запас топлива, необходимого на выведение КТ или УУ на требуемую орбиту, вычислялся согласно методике, изложенной в [6].

Полученное число спусков  $n_c$  использовалось для вычисления суммарной площади собирающей поверхности улавливающего устройства  $F$ , пересекающей межорбитальное пространство и определяющей эффективность предложенного маневра очистки:

$$F = 4\pi R_{уу}^2 n_c; \tag{6}$$

$$R_{уу} = \sqrt{M_{уу} / 4\pi\delta} \tag{7}$$

где  $R_{уу}$  – радиус улавливающего устройства;  $M_{уу}$  – масса улавливающего устройства;  $\delta$  – плотность оболочки сферы (принималась равной  $0,2 \text{ кг/м}^2$ ).

Суммарное время моторного полета космического тральщика  $T$  складывалось из времени, необходимого на спуск-подъем [6], начиная с первого спуска КТ с исходной орбиты до окончания маневра очистки.

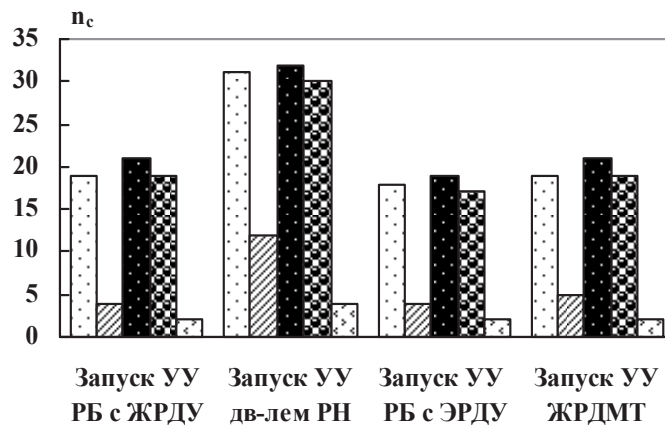
**Результаты исследований.** Исследования проводились расчетным путем на основе приведенной методики применительно к одной из самых мощных РН «Delta-4Н». Ее выбор основан на выводах предыдущих публикаций [1–5], показывающих, что эффективность маневра очистки пропорциональна грузоподъемности РН.

В табл. 1 и на рис. 1–3 приведены результаты расчетов, полученных для рассмотренных вариантов выведения и функционирования КТ и выбранных способов отдельного запуска УУ при использовании указанной РН.

Таблица 1

**Характеристики У**

Параметры	Способ запуска на исходную орбиту			
	РБ с ЖРДУ	двигателем РН	РБ с ЭРДУ	ЖРДМТ
$M_{уу}, \text{ т}$	19,9	4,23	23,2	19,0
$R_{уу}, \text{ м}$	89	41	96	87



□ Вариант 1 ▨ Вариант 2 ■ Вариант 3 ▩ Вариант 4 ◻ Вариант 5

Рис. 1. Число спусков, которое может совершить КТ с УУ, при использовании для их выведения РН «Delta-4Н»

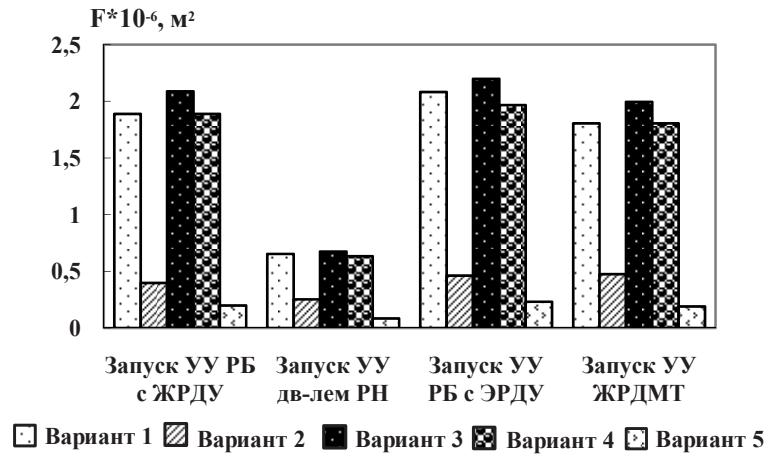


Рис. 2. Суммарная собирающая поверхность УУ, выводимых на требуемую орбиту РН «Delta-4Н»

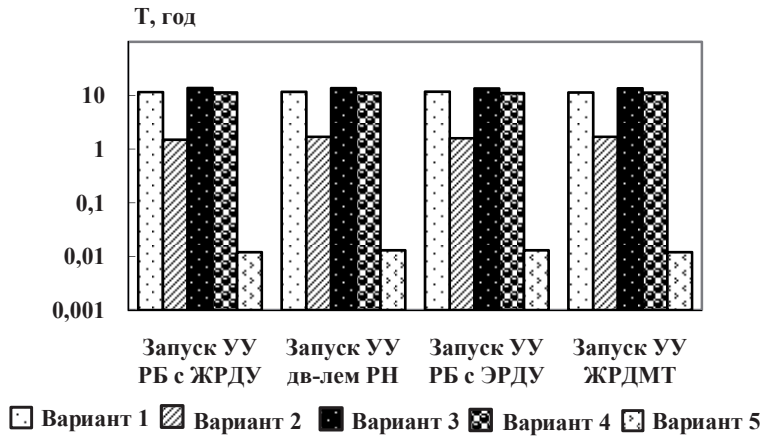


Рис. 3. Суммарное время моторного полета КТ с УУ на этапе очистки при использовании для их выведения РН «Delta-4Н»

Как видно из табл. 1, наибольший радиус УУ может быть обеспечен применением способа их запуска с промежуточной орбиты посредством РБ с ЭРДУ, наименьший – при непосредственном выведении на требуемую орбиту двигателем РН. За счет меньшего радиуса (из-за меньшей массы) при втором способе запуска улавливающего устройства КТ с УУ может совершить большее число спусков  $n_c$  с высокой орбиты на низкую (рис. 1), однако суммарная собирающая поверхность  $F$  (рис. 2) применяемых УУ в этом случае получается наименьшей. Суммарное время  $T$  моторного полета КТ (рис. 3) при данном маневре очистки не зависит от способа запуска УУ.

**Выводы.** Анализируя полученные результаты, можно сделать следующие выводы.

1. При раздельном запуске космического тральщика и нескольких улавливающих устройств эффективность работы КТ в большей степени зависит от площади поперечного сечения УУ, а не от их количества.

2. Наибольшая эффективность рассмотренного маневра очистки достигается при запуске УУ и КТ с промежуточной орбиты разгонным блоком с ЭРДУ и использовании ЭРДУ при спуске КТ с УУ с высокой орбиты на низкую.

3. Запуск УУ непосредственно на требуемую орбиту малоэффективен для всех вариантов выведения КТ.

4. При всех способах запуска использование ЖРДМТ на этапах выведения КТ и спуска КТ с УУ неэффективно.

Предметом дальнейших исследований может быть рассмотрение других маневров очистки и сравнение их эффективности.

### Библиографические ссылки

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 // Шоста Всеукраїнська науково-практична конференція «Інноваційний потенціал української науки – XXI сторіччя» (1–15 квітня 2010 р.): збірник доповідей. – Запоріжжя: Вид-во ПГА, 2010. – С. 134–136.

2. **Дронь Н. М.** Массовые характеристики космических мусорособирающих аппаратов, выводимых известными ракетами-носителями с использованием электроракетной двигательной установки / Н. М. Дронь, Л. Г. Дубовик, А. И. Кондратьев, П. Г. Хорольский // Механіка та машинобудування. – 2010. – № 1. – С. 8–12.

3. **Дронь Н. М.** Массовая эффективность космических тральщиков при использовании жидкостных ракетных двигателей малой тяги / Н. М. Дронь, А. И. Кондратьев, П. Г. Хорольский, Л. Г. Дубовик // Техническая механика. – 2010. – № 3. – С. 100–105.

4. **Дронь Н. М.** Эффективность космических тральщиков при циклическом движении между высокой и низкой орбитами / Н. М. Дронь, П. Г. Хорольский, Л. Г. Дубовик // III Международная конференция «Космические технологии: настоящее и будущее»: тез. докл. – Д., 2011. – С. 33.

5. **Дронь Н. М.** Эффективность очистки околоземного пространства при отдельном выведении космического тральщика и улавливающего устройства / Н. М. Дронь, П. Г. Хорольский, Л. Г. Дубовик // Сборник докладов научной конференции «Информационные технологии в управлении сложными системами». – Д.: Изд-во «Свидлер А.Л.», 2011. – С. 202–205.

6. **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.

7. **Микиша А. Н.** Загрязнение космоса / А. Н. Микиша, Л. В. Рыхлова, М. А. Смирнов // Вестник РАН. – 2001. – Т. 71, № 1. – С. 26–31.

8. **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.

*Надійшла до редколегії 02.11.2011.*

УДК 621.74.002:669.13

**Л. Х. Иванова, Е. В. Колотило, А. Ю. Калашникова**

*Национальная металлургическая академия Украины*

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ВАЛКОВЫХ КОМПЛЕКСНО-МОДИФИЦИРОВАННЫХ ЧУГУНОВ

**Визначені необхідні концентрації модифікуючих та легуючих хімічних елементів для отримання в структурі валкових чавунів графітних включень вермікулярної форми, а також міцнісні властивості чавунів.**

**Ключові слова:** чавун, модифікатор, вермікулярний графіт, мікроструктура, властивості.

© Л. Х. Иванова, Е. В. Колотило, А. Ю. Калашникова, 2012