

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ КОСМИЧЕСКИХ ТРАЛЬЩИКОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ НЕСКОЛЬКИХ УЛАВЛИВАЮЩИХ УСТРОЙСТВ

1. Формулирование проблемы

Одной из насущных проблем, с которой приходится все чаще сталкиваться исследователям космоса, является проблема засоренности его космическим мусором. Так как концентрация космического мусора постоянно растет, существует необходимость в поиске технологий и методов, с помощью которых можно очистить околоземное пространство и таким образом сохранить космическую среду для будущих поколений. Идея применения космических тральщиков (КТ), оснащенных двигательными установками и использующих специальное устройство для улавливания мелких частиц космического мусора с последующим уничтожением их в плотных слоях атмосферы, заслуживает самого пристального внимания.

В исходном положении используемое улавливающее устройство (УУ) находится в свернутом состоянии и размещается под обтекателем ракеты-носителя (РН), которая выводит на требуемую орбиту КТ и УУ в его составе [1-3] или доставляет на исходную орбиту в качестве полезного груза только улавливающее устройство [4]. Во втором случае КТ выводится другой РН такого же типа.

Как видно из приведенных в работе [4] результатов исследований, раздельное выведение КТ и УУ позволяет увеличить время контакта КТ с космическим мусором за счет возможности компенсировать освободившуюся в тральщике массу УУ дополнительным запасом топлива, которое расходуется на этапе целевого использования КТ, а следовательно, увеличить эффективность очистки.

Также представляет интерес возможность использования нескольких улавливающих устройств, выводимых отдельно от КТ, которые в процессе работы он поочередно снимает с орбиты, расширяя тем самым зону сбора космического мусора.

2. Решение проблемы

Целью данной работы является оценка эффективности работы космического тральщика при раздельном запуске КТ и нескольких УУ с использованием ракет-носителей различной грузоподъемности и разных вариантов функционирования КТ при выбранном способе запуска УУ.

Запуск УУ на исходную орбиту предполагается осуществить с промежуточной орбиты посредством разгонного жидкостного двигателя малой тяги (ЖРДМТ). Форма улавливающих устройств – сферическая.

Выполняя процесс очистки, космический тральщик маневрирует в межорбитальном пространстве между высокой и низкой орбитами. В качестве высокой (исходной) орбиты рассматривается орбита высотой 1200 км, низкой – 500 км, промежуточной – 200 км. Все орбиты принимаются круговыми.

На исходную орбиту принятым способом выводятся УУ массой, соответствующей грузоподъемности используемой ракеты-носителя. 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 (ДУ) 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 происходит 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.

3. Результаты исследований

Для выведения КТ на требуемую орбиту и функционирования на этапе очистки рассматривались такие варианты:

- вариант 1 – вывод КТ с помощью РН на промежуточную орбиту, довыведение его на требуемую орбиту разгонным блоком (РБ) с жидкостной ракетной двигательной установкой большой тяги, стыковка с УУ, спуск вместе с УУ на орбиту высотой 500 км за счет работы тормозной электроракетной двигательной установки (ЭРДУ), расстыковка с УУ и подъем на исходную орбиту с помощью разгонной ЭРДУ, стыковка со следующим УУ, дальнейший спуск на низкую орбиту и т.д.;

- вариант 2 – вывод КТ двигателем верхней ступени РН непосредственно на орбиту 1200 км, спуск с УУ на орбиту высотой 500 км, подъем без УУ на исходную орбиту с помощью ЭРДУ и далее – по варианту 1;

- вариант 3 – вывод КТ с помощью РН на промежуточную орбиту, довыведение на требуемую орбиту посредством РБ с ЭРДУ, спуск с УУ на низкую орбиту, подъем без УУ на орбиту высотой 1200 км с помощью ЭРДУ и далее – по варианту 1;

- вариант 4 – вывод КТ с помощью РН на промежуточную орбиту, довыведение на орбиту высотой 1200 км с помощью ЖРДМТ, спуск с УУ на орбиту высотой 500 км, подъем без УУ на исходную орбиту с помощью ЭРДУ и далее – по варианту 1;

- вариант 5 – вывод КТ с помощью РН на промежуточную орбиту, довыведение на орбиту высотой 1200 км с помощью разгонного ЖРДМТ, спуск с УУ на низкую орбиту, подъем без УУ на орбиту высотой 1200 км также с помощью ЖРДМТ и далее – по варианту 1.

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 с УУ определялось по достижению количества топлива, недостаточного для совершения следующего цикла подъема-спуска.

Общий запас топлива M_T определялся из уравнения баланса космического тральщика [5] при отсутствии массы полезной нагрузки.

Запас топлива, необходимый на спуск КТ вместе с УУ с исходной орбиты на низкую орбиту, определялся по формуле

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

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; $J_{y\delta}$ – удельный импульс ЭРД или ЖРДМТ

$$W_{\text{ЭРД}} = V_0 \cdot \left(1 - \frac{1}{\sqrt{r_k}} \right), \quad (2)$$

$$W_{ЖРДМТ} = V_0 \cdot \left(\frac{\sqrt{2}(\bar{r}_K - 1)}{\sqrt{\bar{r}_K}(1 + \bar{r}_K)} - \frac{1 - \sqrt{\bar{r}_K}}{\sqrt{\bar{r}_K}} \right), \quad (3)$$

где V_0 – круговая скорость тральщика на рассматриваемой орбите [5]; \bar{r}_K – отношение радиусов высокой и низкой орбит.

Запас топлива $M_{Тп}$, необходимый на подъем КТ без УУ на исходную орбиту, рассчитывался по формуле

$$M_{Тп} = \tilde{M}_п \left(1 - \frac{1}{e^{W/J_{y\delta}}} \right), \quad (4)$$

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

Масса космического тральщика $M_{КТ}$ для первого, второго и третьего вариантов его выведения вычислялась согласно [1], а для четвертого и пятого – согласно [2].

Масса улавливающего устройства $M_{уу}$ для принятого способа выведения его на исходную орбиту определялась из выражения

$$M_{уу} = M_0 - M_{Т ЖРДМТ}, \quad (5)$$

где M_0 – грузоподъемность РН на круговой орбите высотой 200 км; $M_{Т ЖРДМТ}$ – запас топлива ЖРДМТ, расходуемого на переход с промежуточной орбиты на исходную.

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

$$F = 4\pi R_{уу}^2 n_c, \quad (6)$$

где $R_{уу}$ – радиус улавливающего устройства,

$$R_{уу} = \sqrt{M_{уу} / 4\pi\delta}, \quad (7)$$

где δ – плотность оболочки сферы (принималась равной 0,2 кг/м²).

Суммарное время моторного полета космического тральщика T складывалось из времени, необходимого на спуск-подъем [5], начиная с первого спуска КТ с исходной орбиты до окончания маневра очистки.

Результаты расчетов, полученные для выбранных ракет-носителей и рассмотренных вариантов, представлены в таблице и на рисунке, обозначения в которых соответствуют принятым выше.

Как видно из приведенных данных, для всех вариантов использования разгонного блока при выведении КТ и ЭРДУ при его

функционировании на этапе очистки (варианты 1, 3, 4) число УУ, которые может снять КТ с исходной орбиты, растет с увеличением грузоподъемности применяемых РН. При непосредственном выведении космического тральщика на требуемую орбиту (вариант 2) эта особенность сохраняется лишь для РН малой и средней мощности. Для более мощных ракет-носителей наоборот наблюдается уменьшение числа спусков КТ с УУ с ростом грузоподъемности РН. Это объясняется тем, что несмотря на увеличение запаса топлива КТ его оказывается недостаточно для увеличения числа циклов движения с УУ столь большой массы, т.е. имеет место диспропорция между ростом запаса топлива и ростом его затрат на спуск КТ с УУ. В варианте 5 число таких спусков не зависит от грузоподъемности РН. Время моторного полета КТ и суммарная площадь собирающей поверхности УУ растут с ростом грузоподъемности РН для всех вариантов.

Таблица 1 – Число спусков и суммарное время моторного полета КТ на этапе очистки при раздельном запуске КТ и нескольких УУ

РН	$M_0,$ т	$M_{УУ},$ м	Варианты									
			1		2		3		4		5	
			n_c	$T,$ год	n_c	$T,$ год	n_c	$T,$ год	n_c	$T,$ год	n_c	$T,$ ч
Циклон-3	4,0	3,2	10	1,1	5	0,5	12	1,5	9	1,0	2	17
Arian-42L	7,3	5,8	15	2,9	8	1,2	17	3,6	14	2,7	2	26
Зенит-2	13	10,0	17	5,5	7	1,6	20	7,1	18	5,8	2	55
Delta-4H	24	19,0	19	11,4	5	1,7	21	13,6	19	11,3	2	101

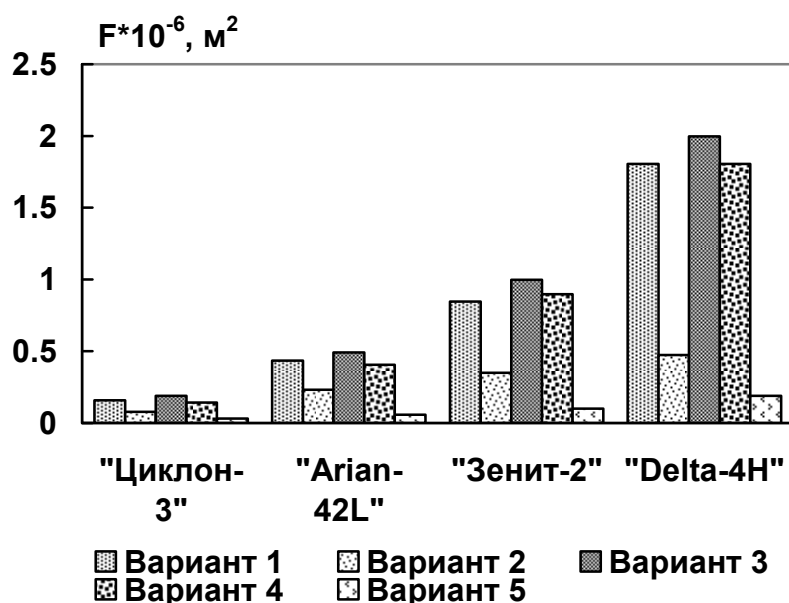


Рисунок – Суммарная площадь собирающей поверхности УУ

Выводы

Таким образом, можно сделать вывод, что при раздельном запуске космического тральщика и улавливающих устройств, применении ЖРДМТ для довыведения УУ с промежуточной орбиты эффективность использования для очистки межорбитального пространства нескольких УУ, поочередно снимаемых КТ с исходной орбиты, растет с ростом грузоподъемности применяемых для их выведения ракет-носителей. Наибольшая эффективность может быть достигнута при использовании РН «Delta-4Н» в варианте довыведения КТ с промежуточной орбиты на требуемую разгонным блоком с ЭРДУ. В этом случае космический тральщик, маневрируя в межорбитальном пространстве также с помощью ЭРДУ, может совершить порядка 21 спуска с высокой орбиты на низкую, на что ему потребуется почти 14 лет моторного времени.

Предметом дальнейших исследований может быть рассмотрение других маневров, совершаемых КТ и УУ.

Список использованных источников

1. Сравнительная оценка характеристик космических тральщиков при трех вариантах маневра их выведения [Текст] / Н.М. Дронь, А.И. Кондратьев, П.Г. Хорольский, Л.Г. Дубовик // *Авиационно-космическая техника и технология*. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2010. – № 10 (77). – С. 21 – 23.

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

3. Эффективность космических тральщиков при циклическом движении между высокой и низкой орбитами [Текст] / Н.М. Дронь, П.Г. Хорольский, Л.Г. Дубовик // III Междунар. конф. «Космические технологии: настоящее и будущее»: тез. докл.. – Д. 2011. – С. 33.

4. Эффективность очистки околоземного пространства при раздельном выведении космического тральщика и улавливающего устройства [Текст] / 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.

5. Методика расчета тяговых и энергомассовых характеристик мусорособирающего космического аппарата с ЭРДУ [Текст] / А.И. Кондратьев, П.Г. Хорольский, Л.Г. Дубовик // *Авиационно-космическая техника и технология*. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2009. – № 10 (67). – С. 82 – 84.

Поступила в редакцию 17.10.2011.

*Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Н. Кобрин,
Национальный аэрокосмический университет
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков*