



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

## (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК

*B64G 1/56 (2018.08); B64G 1/646 (2018.08); B64G 1/648 (2018.08)*

(21)(22) Заявка: 2018105002, 09.02.2018

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
09.02.2018

Дата регистрации:  
28.12.2018

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 09.02.2018

(45) Опубликовано: 28.12.2018 Бюл. № 1

Адрес для переписки:

129110, Москва, ул. Щепкина, 42, стр. 1, 2,  
Госкорпорация "Роскосмос", начальнику  
отдела учета и анализа результатов научно-  
технической деятельности, Н.Г. Горбановскому

(72) Автор(ы):

Трушляков Валерий Иванович (RU),  
Юдинцев Вадим Вячеславович (RU),  
Макаров Юрий Николаевич (RU),  
Шатров Яков Тимофеевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Российская Федерация, от имени которой  
выступает Государственная корпорация по  
космической деятельности "Роскосмос" (RU)

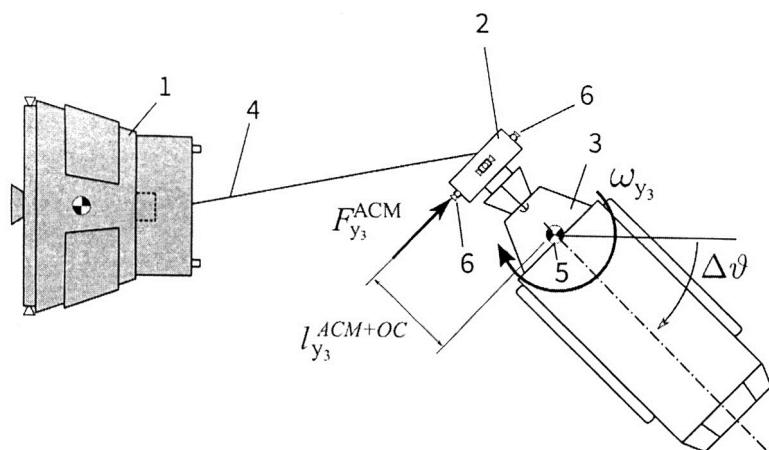
(56) Список документов, цитированных в отчете  
о поиске: RU 2531679 C2, 27.10.2014. RU  
2026243 C1, 09.01.1995. WO 2015152376 A1,  
08.10.2015. US 20120076629 A1, 29.03.2012. US  
6843446 A, 18.01.2005.

(54) Способ очистки орбит от объектов космического мусора

(57) Реферат:

Изобретение относится к методам и средствам очистки орбит от космического мусора, главным образом отработанных ступеней (ОС) ракет-носителей. Способ включает выведение в область очистки космического аппарата-буксира (КАБ) (1) и автономного стыковочного модуля (АСМ) (2) на тросе (4). АСМ (2) стыкуется с ОС (3) и гасит кинетический момент ОС своими управляющими двигателями (6). Кинетический момент связки (1)-(4)-(2)-(3) гасится двигателями КАБ (1) и двигателями (6) АСМ. Сила натяжения троса (4) при стягивании ОС (3) и КАБ (1)

поддерживается двигателями КАБ (1) на уровне, заданном по условию прочности. Спуск ОС на орбиту утилизации производят двигателями КАБ и АСМ. ОС выбирают из условия, чтобы указанные операции по её удалению могут быть осуществлены с располагаемыми энергетикой и тяговооружённостью КАБ и АСМ. Технический результат состоит в повышении вероятности успешного проведения операций по активному спуску с орбиты объектов космического мусора. 5 ил., 1 табл.



Фиг. 2



FEDERAL SERVICE  
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(52) CPC

**B64G 1/56** (2018.08); **B64G 1/646** (2018.08); **B64G 1/648** (2018.08)(21)(22) Application: **2018105002, 09.02.2018**(24) Effective date for property rights:  
**09.02.2018**Registration date:  
**28.12.2018**

Priority:

(22) Date of filing: **09.02.2018**(45) Date of publication: **28.12.2018** Bull. № 1

Mail address:

129110, Moskva, ul. Shchepkina, 42, str. 1, 2,  
Goskorporatsiya "Roskosmos", nachalniku otdela  
ucheta i analiza rezultatov nauchno-tekhnicheskoy  
deyatelnosti, N.G. Gorbanovskomu

(72) Inventor(s):

**Trushlyakov Valerij Ivanovich (RU),**  
**Yudintsev Vadim Vyacheslavovich (RU),**  
**Makarov Yuriy Nikolaevich (RU),**  
**Shatrov Yakov Timofeevich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**Rossiyskaya Federatsiya, ot imeni kotoroy**  
**vystupaet Gosudarstvennaya korporatsiya po**  
**kosmicheskoy deyatelnosti "Roskosmos" (RU)**

(54) **METHOD OF CLEARING ORBIT FROM SPACE DEBRIS**

(57) Abstract:

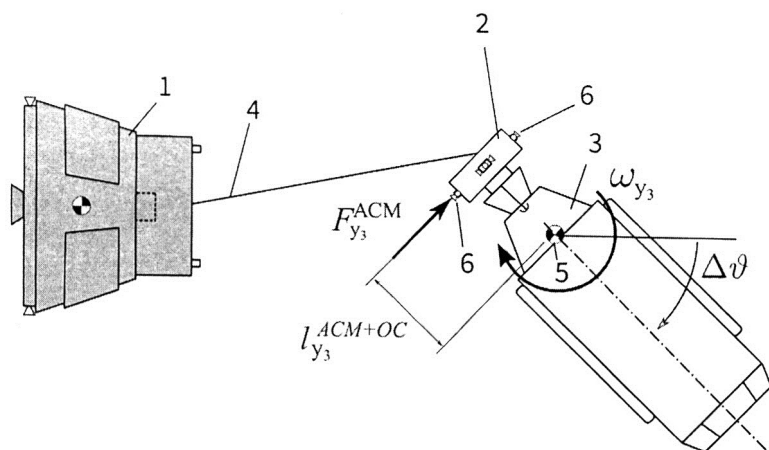
FIELD: cosmonautics; recycling and disposal of waste.

SUBSTANCE: invention relates to methods and means for cleaning orbits of space debris, mainly spent stages (OS) of launch vehicles. Method includes the removal in the area of cleaning of the spacecraft-tug (SCT) (1) and autonomous docking module (ADM) (2) on cable (4). ADM (2) is joined to OS (3) and quenches the kinetic moment of the OS with its control motors (6). Kinetic moment of bundle (1)-(4)-(2)-(3) is extinguished by engines of SCT (1) and engines (6) of ADM. Tension of cable (4) when SS (3) and SCT (1)

are tightened is supported by SCT (1) engines at the level specified by the strength condition. Descent of the SS into the recycling orbit is carried out by engines of SCT and ADM. Operating system is chosen to carry out the said operations for its removal with the available power and thrust-weight equipment of the SCT and the ADM.

EFFECT: technical result consists in increasing the likelihood of successful operations for actively de-orbiting space debris objects.

1 cl, 5 dwg, 1 tbl



Фиг. 2

Изобретение относится к ракетно-космической технике и может быть использовано для активного увода с рабочих орбит различного крупногабаритного космического мусора, например, отработавших ступеней ракет-носителей (ОС), используя для стыковки с этими объектами маневрирующие космические аппараты.

5 Известен способ активного спуска с орбит ОС, реализованный в виде устройства, например, «Космический аппарат для очистки космоса от пассивных КА и их фрагментов» RU №2141436 В64G 1/16.

Наиболее близким по своей технической сущности является патент RU №2531679 В64G 1/16, основанный на выведении космического аппарата-буксира (КАБ) и автономного стыковочного модуля (АСМ) в области орбит, предназначенных для их  
10 очистки от объектов космического мусора, последовательных маневров дальнего и ближнего наведения для стыковки и захвата объектов и их спуск на орбиты утилизации, выбор последовательности объектов из имеющихся на орбитах для их спуска на орбиты утилизации осуществляют путем последовательного сравнения значения критерия для  
15 каждого предполагаемого к спуску объекта, например, вероятности столкновения объекта с другими космическими объектами, кроме того, компенсацию накопленных ошибок параметров движения КАБ при предыдущих маневрах, а также системы целеуказания распределяют между корректирующими импульсами КАБ на этапе дальнего наведения и АСМ на участке самонаведения из условия обеспечения  
20 относительных параметров движения КАБ и объекта на начало этапа самонаведения АСМ, соответствующих вероятности стыковки и захвата объекта не ниже заданной.

К недостаткам этого технического решения относятся следующие позиции.

1) Как правило, ОС являются некооперируемыми объектами, вращающимися с угловой скоростью, которую необходимо обнулить после стыковки с АСМ, т.е.  
25 стабилизировать угловое движение связки «АСМ+ОС», используя двигательную установку (ДУ) АСМ. Рассматриваемое техническое решение не учитывает тот факт, что кинетический момент состыкованной связки «АСМ+ОС», определяемый произведением тензора инерции этой системы на вектор угловой скорости, должен быть таким, чтобы управляющие моменты, развиваемые двигательной установкой  
30 АСМ, могли его обнулить, учитывая ограничение по управляющим моментам, развиваемым двигательной установкой АСМ. Следовательно, необходимо принимать во внимание ограничение на инерционно-массовые и центровочные характеристики и кинематические параметры движения вокруг центра масс ОС, выбираемой в качестве объекта-кандидата для спуска с орбиты.

35 2) Не учитывается предельное время стабилизации жесткой системы «АСМ+ОС» с помощью двигательной установки АСМ, которое должно быть таким, чтобы угол разворота жесткой системы «АСМ+ОС» в каждом канале стабилизации на этапе стабилизации не превышал заданной величины, определяемой взаимным положением системы «АСМ+ОС», КАБ и положением троса.

40 3) Не учитывается возможность увеличения угловой скорости связки «КАБ+трос+АСМ+ОС» на этапе сближения «АСМ+ОС» и КАБ с помощью тросовой системы, вызванное начальным относительным движением центров масс ОС и КАБ, и соответствующее увеличение натяжение троса, которое может превысить его прочность.

4) Не учитываются требования к устойчивости и управляемости системы «КАБ+АСМ+ОС» на этапе спуска при помощи двигательной установки КАБ, которое  
45 накладывает ограничения на инерционно-массовые и центровочные характеристики ОС, двигательную установку КАБ.

5) Не учитывается возможность использования на этапе спуска двигательной

установки АСМ в случае нехватки управляющих моментов КАБ.

Целью предлагаемого технического решения является устранение указанных недостатков прототипа, которая достигается тем, что в известный способ, основанный на выведении КАБ и АСМ в области орбит, предназначенных для их очистки от объектов космического мусора, последовательных маневров дальнего и ближнего наведения для стыковки и захвата объектов и их спуск на орбиты утилизации, выборе последовательности объектов, из имеющихся на орбитах для их спуска на орбиты утилизации, осуществляют путем последовательного сравнения значения критерия для каждого предполагаемого к спуску объекта, распределение компенсации накопленных ошибок параметров движения КАБ при предыдущих маневрах, а также системы целеуказания, между корректирующими импульсами КАБ на этапе дальнего наведения и АСМ на участке самонаведения из условия обеспечения относительных параметров движения КАБ и объекта на начало этапа самонаведения АСМ, вводят следующие дополнительные действия.

Выбор ОС осуществляют из следующих дополнительных условий:

1) собственный кинетический момент ОС не должен превышать заданного значения, определяемого управляющим моментом двигательной установки АСМ и заданным временем на обнуление этого кинетического момента;

2) кинетический момент системы «КАБ+трос+АСМ+ОС» на участке стягивания и торможения вращения не должны превышать заданных значений, определяемых управляющими моментами двигательных установок АСМ и КАБ;

3) при увеличении силы натяжения троса до критических значений задействуется двигательная установка КАБ, сила тяги которой направлена против силы натяжения, действующей на трос, для снижения ее уровня до допустимых значений;

4) управление движением системы «КАБ+АСМ+ОС» при маневре спуска на орбиту утилизации осуществляется с помощью двигательных установок КАБ и АСМ.

Реализация способа

Сущность предлагаемого способа поясняется схемами, представленными на фигурах, где

на фиг. 1 приведены отдельные объекты КАБ - 1, АСМ - 2, ОС - 3, трос - 4;

на фиг. 2 - система «АСМ+ОС» на тросовой связи с КАБ 1;

на фиг. 3 - система «КАБ+АСМ+ОС»;

на фиг. 4 - процесс стягивания КАБ и «АСМ+ОС» с помощью троса;

на фиг. 5 - процесс стабилизации системы «АСМ+ОС» за счет приложения тяг

камерами двигательной установки АСМ при стягивании с КАБ.

1) Ограничение на кинетический момент ОС.

Предположим, что угловые скорости ОС по осям  $\omega_{x3}$ ,  $\omega_{y3}$ ,  $\omega_{z3}$  малы, так что членами, содержащими их произведение можно пренебречь, тогда угловое движение в каждом канале можно рассматривать независимо. Например, в канале рыскания (вращение вокруг оси ось  $y_3$  перпендикулярной плоскости фиг. 2) уравнение углового движения (уравнение Эйлера) можно записать в виде:

$$I_{y3}^{АСМ+ОС} \dot{\omega}_{y3} = -M_{y3}^{АСМ} \quad (1)$$

где  $I_{y3}^{АСМ+ОС}$  - момент инерции системы «АСМ+ОС» относительно оси  $y_3$ ,

проходящей через ее центр масс 5,  $\dot{\omega}_{y3}$  - угловое ускорение в канале рыскания,  $M_{y3}^{АСМ}$  - управляющий момент в канале рыскания органов управления АСМ относительно центра масс 5 системы «АСМ+ОС». Знак минус в правой части показывает, что

управляющий момент уменьшает угловую скорость «АСМ+ОС». Предполагается, что трос не оказывает влияние на движение системы «АСМ+ОС». В начальный момент времени угловая скорость системы:

$$\omega_{y3}(0) = \omega_{y30}.$$

Начальное значение угловой скорости системы в момент начала торможения ( $t=0$ ) для обнуления кинетического момента -  $\omega_{y30}$  измеряется бортовой аппаратурой АСМ. Управляющий момент в канале рыскания органов управления АСМ определяется выражением:

$$M_{y3}^{АСМ} = F_{y3}^{АСМ} l_{y3}^{АСМ+ОС} \quad (2)$$

где:  $F_{y3}^{АСМ}$  - тяга двигателя 6 АСМ в канале рыскания,  $l_{y3}^{АСМ+ОС}$  - плечо управляющего момента относительно центра масс системы «АСМ+ОС».

Выражение для угловой скорости  $\omega_{y3}$  и угла  $\vartheta$  получаются в результате интегрирования уравнения (1) на интервале времени работы двигателей АСМ - от  $t_0=0$  до  $t_K=T$ :

$$\omega_{y3}(T) = \omega_{y30} - \frac{M_{y3}^{АСМ}}{I_{y3}^{АСМ+ОС}} T \quad (3)$$

$$\vartheta(T) = \vartheta_0 + \omega_{y30} T - \frac{M_{y3}^{АСМ}}{2 I_{y3}^{АСМ+ОС}} T^2 \quad (4)$$

где:  $\vartheta_0$  - значения начального угла рыскания системы «АСМ+ОС» на момент начала работы двигателей. После окончания работы ДУ АСМ должно удовлетворяться условие:

$$\omega_{y3}(T) = 0 = \omega_{y30} - \frac{M_{y3}^{АСМ}}{I_{y3}^{АСМ+ОС}} T \quad (5)$$

а ограничение по изменению углового положения системы «АСМ+ОС» от углового положения АСМ на момент начала обнуления кинетического момента не должно быть более  $\Delta\vartheta_{зад}$ :

$$\Delta\vartheta = \vartheta(T) - \vartheta_0 = \omega_{y30} T - \frac{M_{y3}^{АСМ}}{2 I_{y3}^{АСМ+ОС}} T^2 \leq \Delta\vartheta_{зад} \quad (6)$$

Выражая из (5) время обнуления кинетического момента, с учетом (3) получим:

$$T = \frac{I_{y3}^{АСМ+ОС} \omega_{y30}}{M_{y3}^{АСМ}} \quad (7)$$

Условие (6) принимает вид

$$\frac{1}{2} \frac{I_{y3}^{АСМ+ОС}}{M_{y3}^{АСМ}} \omega_{y30}^2 \leq \Delta\vartheta_{зад} \quad (8)$$

или

$$\omega_{y30} \leq \sqrt{\frac{2 F_{y3}^{АСМ} l_{y3}^{АСМ+ОС}}{I_{y3}^{АСМ+ОС}} \Delta\vartheta_{зад}} \quad (9)$$

Например, для связки (ОС+АСМ) с суммарным моментом инерции  $I_{y3}^{АСМ+ОС} = 10^4$  кг·м<sup>2</sup> плечом управляющего момента относительно центра масс системы «АСМ+ОС»  $l_{y3}^{АСМ+ОС} = 5$  м, тягой ДУ  $F_{y3}^{АСМ} = 50$  Н и  $\Delta\vartheta_{зад} = \pi/2$ :

$$\omega_{y30} \leq \sqrt{\frac{2 \cdot 50 \text{ Н} \cdot 5 \text{ м}}{10\,000 \text{ кг} \cdot \text{м}^2} \cdot \frac{\pi}{2}} \approx 16 \text{ град/с} \quad (10)$$

Двигатели ориентации, применяемые на разгонных блоках и космических аппаратов (КА), имеют как правило небольшую тягу, поэтому полученное значение предельной угловой скорости (10) невелико. Учитывая задачи, возлагаемые на АСМ, целесообразно использовать для управления угловым движением ДУ большей тяги.

Как следует из условий (6)-(8) параметры процесса обнуления кинетического момента системы (АСМ+ОС) определяются:

- параметрами двигательной установки и конструкции АСМ;
- моментно-центровочными характеристиками ОС и АСМ;
- допустимым изменением углового положения системы «АСМ+ОС» до обнуления ее угловой скорости.

2) Ограничения на кинематические параметры относительного движения КАБ и «АСМ+ОС».

Из-за относительного движения центров масс объектов КАБ и связки «АСМ+ОС» (фиг. 4), поскольку «КАБ+АСМ» и ОС до стыковки двигались по своим орбитам (поз. 7 и 8 фиг. 4), после стыковки и образования связки «АСМ+ОС» система «КАБ+трос+АСМ+ОС» будет вращаться вокруг общего центра масс 9 с угловой скоростью  $\omega_{c0}$ .

Угловая скорость будет увеличиваться с уменьшением длины троса вследствие закона сохранения кинетического момента. Например, при стыковке АСМ и КАБ, движущихся по эллиптической орбите  $h_{1p} \times h_{1a}$  с ОС, движущейся в той же плоскости по круговой орбите с высотой  $h_{3a} = h_{1a}$ , разность скоростей в общей точке двух орбит будет

определяться выражением<sup>1</sup> (<sup>1</sup> Суханов А.А. Астродинамика / А.А. Суханов - М.: Институт Космических исследований РАН, 2010):

$$\begin{aligned} \Delta V &= V_3 - V_1 = \sqrt{\frac{\mu}{p_3}} - \sqrt{\frac{\mu}{p_1}} (1 - e) = \sqrt{\frac{\mu}{r_3}} - \sqrt{\frac{\mu}{r_{1a}(1 - e)}} (1 - e) = \\ &= \sqrt{\frac{\mu}{r_3}} - \sqrt{\frac{\mu}{r_3(1 - e)}} (1 - e) = \sqrt{\frac{\mu}{r_3}} (1 - \sqrt{1 - e}) \end{aligned} \quad (11)$$

где  $r_3 = p_3 = r_{1a}$  - радиус орбиты ОС и радиус апогея КАБ,  $\mu = 3.986 \cdot 10^5$  км<sup>3</sup>/с<sup>2</sup> - гравитационная постоянная Земли,  $p_3$  - фокальный параметр орбиты КАБ,  $e$  - эксцентриситет орбиты КАБ  $e = (r_{1a} - r_{1p}) / (r_{1a} + r_{1p})$ ,  $r_{1p}$  - радиус перигея орбиты КАБ. Для  $h_a = 900$  км,  $h_p = 600$  км разность скоростей (11) достигает 78 м/с.

Начальная угловая скорость связки «КАБ+трос+АСМ+ОС» будет определяться выражением:



$$\omega_{c0} = \frac{\Delta V}{l_0} \quad (12)$$

где  $l_0$  - начальное расстояние между центрами масс КАБ и АСМ с ОС, определяемое длиной троса  $l_0 = d_1 + d_3$ , где  $d_1$  - расстояние от центра масс КАБ 12 до точки закрепления 10 троса на КАБ,  $d_3$  - расстояние от центра масс 5 связки АСМ и ОС до точки закрепления 11 троса на АСМ. Для  $l_0=1$  км начальная угловая скорость (12) будет равна:

$$\omega_{c0} = \frac{\Delta V}{l_0} = \frac{78 \text{ м/с}}{1000 \text{ м}} \approx 4,5^\circ/\text{с} \quad (13)$$

Связка «КАБ+трос+ОС+АСМ» будет вращаться вокруг общего центра масс 9. Начальный момент инерции связки, как системы материальных точек (без учета собственных моментов инерции тел) относительно центра масс связки «КАБ+трос+ОС+АСМ» будет определяться выражением<sup>2</sup> (Маркеев А.П. Теоретическая механика: Учебник для университетов. - М.: Регулярная и хаотическая динамика, 1999):

$$\begin{aligned} J_0 &= l_3^2(m_{\text{АСМ}} + m_{\text{ОС}}) + l_1^2 m_{\text{КАБ}} = \\ &= l_0^2 \left( \frac{m_{\text{КАБ}}}{m_{\text{АСМ}} + m_{\text{ОС}} + m_{\text{КАБ}}} \right)^2 (m_{\text{АСМ}} + m_{\text{ОС}}) \\ &\quad + \left( \frac{m_{\text{АСМ}} + m_{\text{ОС}}}{m_{\text{АСМ}} + m_{\text{ОС}} + m_{\text{КАБ}}} \right)^2 l_0^2 m_{\text{КАБ}} = \\ &= l_0^2 \frac{m_{\text{КАБ}}^2 (m_{\text{АСМ}} + m_{\text{ОС}}) + (m_{\text{АСМ}} + m_{\text{ОС}})^2 m_{\text{КАБ}}}{(m_{\text{АСМ}} + m_{\text{ОС}} + m_{\text{КАБ}})^2} = \\ &= l_0^2 \frac{m_{\text{КАБ}} (m_{\text{АСМ}} + m_{\text{ОС}})}{m_{\text{АСМ}} + m_{\text{ОС}} + m_{\text{КАБ}}} = m l_0^2, \end{aligned} \quad (14)$$

где  $m$  - приведенная масса связки «КАБ+трос+АСМ+ОС»:

$$m = \frac{m_{\text{КАБ}}(m_{\text{АСМ}} + m_{\text{ОС}})}{m_{\text{АСМ}} + m_{\text{ОС}} + m_{\text{КАБ}}}, \quad (15)$$

$l_1$  - расстояние от центра масс 9 связки «КАБ+трос+АСМ+ОС» до центра масс КАБ 12,  $l_3$  - расстояние от центра масс 9 связки «КАБ+трос+АСМ+ОС» до центра масс 5 связки АСМ с ОС. Выражение для кинетического момента связки «КАБ+трос+ОС+АСМ» относительно ее центра масс после стыковки будет иметь вид<sup>2</sup> (Маркеев А.П. Теоретическая механика: Учебник для университетов. - М.: Регулярная и хаотическая динамика, 1999):

$$K = J_0 \omega_{c0} = m l_0^2 \omega_{c0} = m l_0 \Delta V \quad (16)$$

В соответствии с законом сохранения кинетического момента системы:

$$K = J \omega_c = J_0 \omega_{c0} = \text{const}, \quad (17)$$

при уменьшении длины троса, момент инерции связки ( $J$ ) будет уменьшаться, а

угловая скорость будет увеличиваться. При длине троса  $l$  угловая скорость будет равна:

$$\omega_c = \frac{J}{J_0} \omega_{c0} = \frac{m l_0^2}{m l^2} \omega_{c0} = \frac{l_0^2}{l^2} \omega_{c0} = \frac{l_0}{l^2} \Delta V, \quad (18)$$

Модуль кинетического момента системы «КАБ+трос+АСМ+ОС» после ее формирования и до стыковки КАБ с АСМ и ОС необходимо уменьшить, используя двигательные установки управления угловым движением КАБ -  $F_{y3}^{КАБ}$  и АСМ -  $F_{y3}^{АСМ}$  (фиг. 4). Силы, создаваемые двигательными установками управления угловым движением КАБ и АСМ, должны лежать в одной плоскости и направлены в противоположные стороны, создавая момент относительно центра масс связки, противоположный направлению вращения связки.

3) Определим силу тяги, необходимую для гашения угловой скорости тросовой системы. Для простоты предположим, что угловая скорость тросовой системы уменьшается только за счет действия силы тяги АСМ -  $F_{y3}^{АСМ} \gg F_{y3}^{КАБ}$  (фиг. 4). Влиянием  $F_{y3}^{АСМ}$  на движение центра масс связки пренебрегаем. Одновременно с уменьшением угловой скорости связки уменьшается длина троса. Предположим, что расстояние между центрами масс КАБ 12 и связки АСМ с ОС 5 уменьшается по линейному закону:

$$l = l_0 - k t$$

где  $k$  - скорость изменения длины троса.

Теорема об изменении кинетического момента системы, состоящей из двух материальных точек с массами  $m_{АСМ}+m_{ОС}$  и  $m_{КАБ}$ , соединенных тросом и вращающегося вокруг общего центра масс будет иметь вид:

$$\frac{dJ}{dt} \omega + J \frac{d\omega}{dt} = -F_{y3}^{АСМ} \frac{l m_{КАБ}}{m_{АСМ} + m_{ОС} + m_{КАБ}} \quad (19)$$

Момент инерции тросовой систем относительно ее центра масс определяется следующим образом

$$J = (l_0 - k t)^2 m \quad (20)$$

Подставляя (20) в (19), обозначив  $m_3=(m_{АСМ}+m_{ОС})$  получим следующее дифференциальное уравнение:

$$-2 k m_3 \omega + (l_0 - k t) m_3 \frac{d\omega}{dt} = -F_{y3}^{АСМ} \quad (21)$$

или

$$m_1 \int_{\omega_0}^0 \frac{d\omega}{2 k m_3 \omega - F_{y3}^{АСМ}} = \int_0^{t_k} \frac{dt}{(l_0 - k t)}. \quad (22)$$

Интегрируя уравнение (22) получим оценку тяги  $F_{y3}^{АСМ}$ , необходимую для гашения угловой скорости тросовой системы при выбранном законе изменения длины троса:

$$F_{y3}^{АСМ} = \frac{2(l_0 - l_k)(m_{АСМ} + m_{ОС}) \omega_0}{1 - \left(\frac{l_k}{l_0}\right)^2} \frac{1}{t_k}. \quad (23)$$

где  $l_k = l_0 - k t_k$ . При массе КАБ=1000 кг, массы ОС с АСМ  $m_{АСМ}+m_{ОС}=4000$  кг, начальной угловой скорости тросовой системы  $\omega_0=10^\circ/\text{с}$ ,  $l_0 = 100$  м,  $l_k = 10$  м и  $t_k=500$  с, тяга АСМ должна быть

$$F_{y3}^{АСМ} = \frac{2(100 \text{ м} - 10 \text{ м}) 4000 \text{ кг} \cdot 10^\circ/\text{с}}{1 - \left(\frac{10 \text{ м}}{100 \text{ м}}\right)^2} \cdot \frac{1}{500 \text{ с}} \approx 0,25 \text{ кН}. \quad (24)$$

Сила  $F_{y3}^{АСМ}$  будет создавать момент относительно центра масс связки АСМ и ОС, что приведет к увеличению угла  $\Delta\vartheta$  между продольной осью АСМ и линией троса (фиг. 4) и снижению эффективности гашения угловой скорости тросовой системы, вследствие изменения направления силы  $F_{y3}^{АСМ}$  по отношению к тросу.

Действие силы  $F_{y3}^{АСМ}$  на относительное движение троса и связки АСМ с ОС (или КАБ, если для гашения угловой скорости тросовой системы используется ДУ КАБ) может быть компенсировано моментом создаваемыми двигателями ориентации АСМ -  $F_{y3}^a$  13 (фиг. 5). Тяга  $F_{y3}^a$  будет зависеть от угла между линией троса и продольной осью АСМ и от силы натяжения троса Т. Предполагая малость углового ускорения тросовой системы, из условия равенства нулю суммы моментов от силы натяжения троса, силы  $F_{y3}^{АСМ}$  и сил двигателей ориентации 13:

$$F_{y3}^a \approx \frac{(l_{y3}^{АСМ+ОС} F_{y3}^{АСМ} - T l_T)}{2 l_a} = \frac{(l_{y3}^{АСМ+ОС} F_{y3}^{АСМ} - T (ОС) \cdot \sin \Delta\vartheta)}{2 l_a}. \quad (25)$$

Угловая скорость вращения связки КАБ и АСМ с ОС на тросовой связи вокруг общего центра масс 9 приводит к возникновению в тросе 4 растягивающего усилия Т (фиг. 5), которое не должно превышать предельного значения, определяемого прочностными характеристиками троса и узлов его крепления на КАБ 10 и АСМ 11.

Рассмотрим движение КАБ вокруг центра масс тросовой системы. КАБ движется по окружности радиуса

$$l_1 = l \frac{m_{АСМ} + m_{ОС}}{m_{АСМ} + m_{ОС} + m_{КАБ}}.$$

Центростремительное ускорение КАБ, равное произведению квадрата угловой скорости тросовой системы и расстояния от ее центра масс 9 до центра масс КАБ<sup>3</sup> (3 Маркеев А.П. Теоретическая механика: Учебник для университетов. - М.: Регулярная и хаотическая динамика, 1999) 12 (фиг. 5), создается силой натяжения троса Т, которая равна произведению центростремительного ускорения КАБ и его массы:

$$T = \omega_c^2 l_1 m_{КАБ} = l \frac{m_{АСМ} + m_{ОС}}{m_{АСМ} + m_{ОС} + m_{КАБ}} m_{КАБ}. \quad (26)$$

Для троса с площадью поперечного сечения S, изготовленного из материала с

известным предельным напряжением  $[\sigma]$ , угловая скорость связки вокруг центра масс не должна превышать значения:

$$\omega_c < \sqrt{\frac{S}{l} \frac{(m_{АСМ} + m_{ОС} + m_{КАБ})}{(m_{АСМ} + m_{ОС})m_{КАБ}}} [\sigma]. \quad (27)$$

Для уменьшения силы натяжения троса может быть использован главный (маршевый) двигатель КАБ, создающий тягу  $F_{КАБ}$  (фиг. 5), направленную вдоль линии троса.

Ускорение КАБ, создаваемое силой натяжения троса, может быть уменьшено на величину ускорения, создаваемого ДУ КАБ:

$$T = \left( \omega_c^2 l - \frac{F_{КАБ}}{m_{КАБ}} \right) \frac{m_{АСМ} + m_{ОС}}{m_{АСМ} + m_{ОС} + m_{КАБ}} m_{КАБ},$$

при этом суммарное ускорение будет равно центростремительному ускорению при движении КАБ вокруг центра масс связки 9 (фиг. 5).

С учетом действия двигателя КАБ условие (27) примет вид:

$$\omega_c < \sqrt{\frac{S}{l} \frac{(m_{АСМ} + m_{ОС} + m_{КАБ})}{(m_{АСМ} + m_{ОС})m_{КАБ}}} [\sigma] + \frac{F_{КАБ}}{m_{КАБ} l}. \quad (28)$$

Например, при суммарной массе АСМ и ОС  $m_{АСМ}+m_{ОС}=4000$  кг, массе КАБ  $m_{КАБ}=1000$  кг, тяге двигателя КАБ  $F_{КАБ}=3000$  Н угловая скорость системы с тросом диаметром 4 мм из материала с  $[\sigma]=3$  ГПа (трос из материала Spectra-1000 с плотностью 0,97 г/см<sup>3</sup>) и длиной 1 км должна быть не более:

$$\omega_c < \sqrt{\frac{\pi (0,004 \text{ м})^2}{4 \cdot 1000 \text{ м}} \frac{(4000 \text{ кг} + 1000 \text{ кг})}{4000 \text{ кг} \cdot 1000 \text{ кг}} 3 \cdot 10^9 \text{ Па} + \frac{3000 \text{ Н}}{1000 \text{ кг} \cdot 1000 \text{ м}}} \approx 13 \text{ град/с}.$$

4) Возможности двигательной установки КАБ по обеспечению устойчивости и управляемости системы «КАБ+АСМ+ОС» при реализации маневра для перехода на орбиту спуска.

Предполагается, что расположение объектов КАБ, АСМ, ОС в системе «КАБ+АСМ+ОС» соответствует фиг. 3 поз. 1, 2, 3: продольные оси всех объектов и центры масс находятся на общей продольной оси системы «КАБ+АСМ+ОС» (поз. 14, фиг. 3), а направления осей связанной с АСМ системой координат совпадает с направлением связанных осей КАБ, т.е. управляющие моменты КАБ совпадают с управляющими моментами АСМ.

Из-за возможного появления возмущающих моментов, обусловленных:

- появлением смещения центра масс системы «КАБ+АСМ+ОС» (поз. 15, фиг. 3) в поперечной плоскости;

- наличием остатков жидкого топлива в баках ОС и т.д.,

необходимо обеспечение условия управляемости и качества процесса стабилизации, соответственно, точности отработки импульса маневра спуска двигательной установкой КАБ, за счет управляющих моментов КАБ -  $M_F$ . Должно выполняться условие:

$$M_F \geq F_{КАБ} \delta. \quad (29)$$

Для тяги главного двигателя КАБ  $F_{КАБ}=3000$  Н и максимального смещения центра масс системы  $\delta=0,05$  м суммарный момент  $M_F$ , создаваемый двигателями ориентации, должен быть не менее 150 Н·м, что на плече  $h$  от 3 до 4 м соответствует тяге  $F_{КАБ}$  от 38 до 50 Н.

Как было отмечено выше, двигатели ориентации, применяемые на существующих в настоящее время разгонных блоках (РБ), как правило, имеют меньшую тягу, и не предназначены парирования возмущений такого уровня (таблица 1), поэтому управление движением «КАБ+АСМ+ОС» предлагается осуществлять за счет двигательной установки КАБ (маршевый и рулевые сопла ориентации и стабилизации) и дополнительное использование двигательной установки и системы управления АСМ -  $F_{у3}^{АСМ}$ .

Таблица 1 – Тяга ДУ РБ

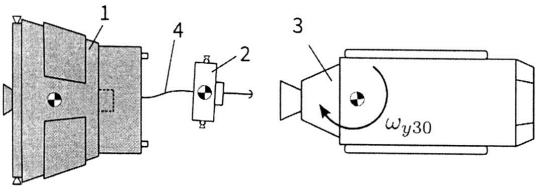
Разгонный блок	Тяга маршевой ДУ, $F_{КАБ}$	Тяга ДУ ориентации и стабилизации, $F_{у3}^{АСМ}$
РБ «Бриз»	19 кН	13,3 Н
РБ «Фрегат»	19 кН	50 Н
БВ «Волга»	3 кН	25 Н

Использование предлагаемого технического решения позволит выбрать ОС с учетом не только критериев опасности столкновения с другими космическими объектами, но и с учетом возможностей КАБ, АСМ.

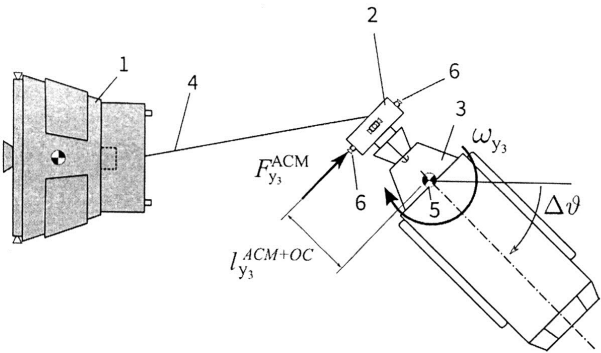
#### (57) Формула изобретения

Способ очистки орбит от объектов космического мусора, основанный на выведении космического аппарата-буксира (КАБ) и автономного стыковочного модуля (АСМ) в области орбит, предназначенных для их очистки от объектов космического мусора, например отработавших ступеней ракет-носителей (ОС), последовательных маневрах дальнего и ближнего наведения для стыковки и захвата ОС и их спуска на орбиты утилизации, выборе последовательности ОС путем последовательного сравнения значения критерия для каждой предполагаемой ОС, например вероятности столкновения ОС с другими космическими объектами, отличающийся тем, что ОС дополнительно выбирают из условий, чтобы собственный кинетический момент ОС не превышал заданного значения, определяемого управляющим моментом двигательной установки АСМ и заданным временем на обнуление этого кинетического момента, а кинетический момент системы КАБ+трос+АСМ+ОС на участке стягивания и торможения вращения не превышал заданных значений, определяемых управляющими моментами двигательных установок АСМ и КАБ, обеспечивающих его обнуление, при этом торможение связки осуществляют с использованием двигательной установки АСМ, при увеличении силы натяжения троса до критических значений прикладывают продольный импульс двигательной установки КАБ, направленный против силы натяжения, до снижения ее до значения, определяемого прочностью троса, управление движением системы КАБ+АСМ+ОС при маневре спуска на орбиту утилизации осуществляют с помощью двигательных установок КАБ и АСМ.

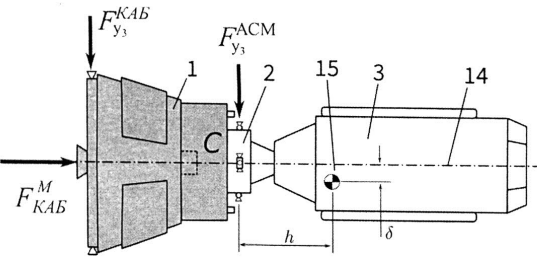
СПОСОБ ОЧИСТКИ ОРБИТ ОТ ОБЪЕКТОВ  
КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА



Фиг. 1

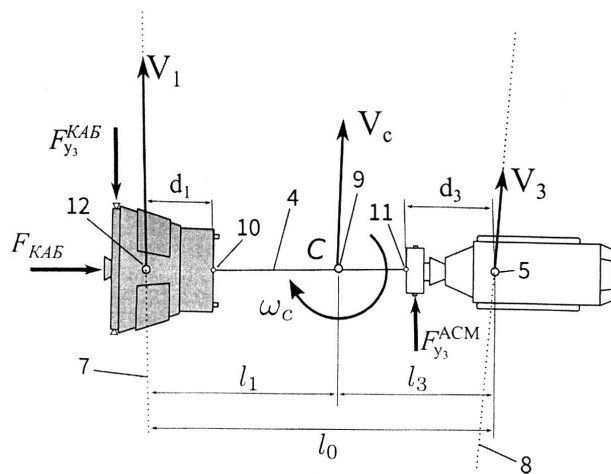


Фиг. 2

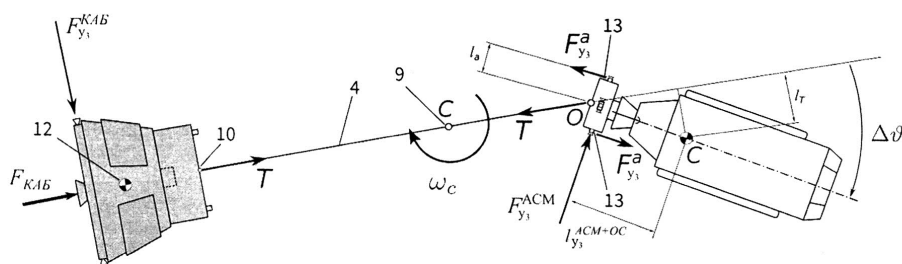


Фиг. 3

СПОСОБ ОЧИСТКИ ОРБИТ ОТ ОБЪЕКТОВ  
КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА



Фиг. 4



Фиг. 5