

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(11) **038352**(13) **B1**

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ

(45) Дата публикации и выдачи патента
2021.08.12

(21) Номер заявки
201900385

(22) Дата подачи заявки
2019.07.26

(51) Int. Cl. **B64G 1/10** (2006.01)
B64G 1/62 (2006.01)
B64G 1/64 (2006.01)

(54) СПОСОБ УВОДА ОБЪЕКТОВ КРУПНОГАБАРИТНОГО КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА И УСТРОЙСТВО ДЛЯ ЕГО РЕАЛИЗАЦИИ

(43) **2021.01.31**

(96) **2019000072 (RU) 2019.07.26**

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ "ОМСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ" (RU)**

(56) RU-C2-2521082
US-B2-7207525
US-B2-9463884
US-A1-20100193640

(72) Изобретатель:
**Трушляков Валерий Иванович,
Юдинцев Вадим Вячеславович (RU)**

(57) Предложено изобретение, которое относится к области ракетно-космической техники и может быть использовано для очистки околоземного космического пространства от объектов крупногабаритного космического мусора на тресе. На этапе ближнего наведения формируют вращающуюся тросовую систему. Предложенная тросовая система включает управляемый тросовый барабан, трос, отделяемый на тресе транспортно-стыковочный модуль с системой жёсткой стыковки с космическим мусором, декартовую двигательную установку с системой стыковки и захвата, космический буксир, оснащённый двигательной установкой. Управление натяжением троса, соединяющего космический буксир с транспортно-стыковочным модулем, осуществляют изменением длины троса с учётом действия на космический буксир силы тяги, силы натяжения троса от вращения тросовой системы вокруг её центра масс. При достижении центром масс тросовой системы заданной орбитальной скорости движения космического мусора осуществляют его отделение путём разрыва жёсткой механической связи между транспортно-стыковочным модулем и тросом. После отделения космического мусора осуществляют торможение вращения связки (космический буксир-трос-транспортно-стыковочный модуль), стягивание в единую жёсткую связку и манёвр связки к следующему объекту космического мусора.

B1**038352****038352****B1**

Изобретение относится к области ракетно-космической техники и может быть использовано для очистки околоземного космического пространства от объектов крупногабаритного космического мусора (КМ), типа прекративших активное существование космических аппаратов, отделившихся частей последних ступеней ракет-носителей и разгонных блоков.

Известен способ по патенту РФ № 2521082 В64G 1/00, в котором предлагается внести изменения обозначений для заявляемого изобретения, с учётом уточненных обозначений способ формулируется следующим образом: способ стыковки космических аппаратов (КА), один из которых пассивный (ПКА), это далее - космический мусор (КМ), а другой, сближающийся с ним - активный (АКА), это далее - космический буксир (КБ), включающий использование самонаводящегося космического микробуксира (КМБ), это далее - транспортно-стыковочный модуль (ТСМ) для доставки троса к КМ, выпускаемого с КБ и оснащенного стыковочным штырем, при сближении с КМ на минимальное расстояние, стыковку, стягивание механической связки (КБ - ТСМ - КМ) с помощью троса, отличающийся тем, что после создания механической связки (ТСМ - КМ) совмещают продольные оси КБ и связки (ТСМ - КМ) с направлением линии, соединяющей их центры масс, осуществляют стабилизацию углового положения КБ и связки (ТСМ - КМ) в инерциальной системе координат с центром, находящимся в центре масс КБ, и с помощью продольных ускорений, развиваемых двигателями КБ и ТСМ, осуществляют снижение натяжения троса до минимального, а после касания связки (ТСМ - КМ) посадочного места на КБ осуществляют фиксацию связки (ТСМ - КМ) с помощью системы, установленной на КБ.

Недостатки этого способа стыковки, предусматривающего "толкающую" схему, заключаются в следующем:

а) при стыковке на пересекающихся курсах КБ и КМ при стягивании КБ и связки (ТСМ - КМ) с помощью троса угловая скорость связки (КБ - трос - ТСМ - КМ) будет увеличиваться с уменьшением расстояния между КБ и связкой (ТСМ - КМ) и для её уменьшения необходимо приложение тормозных импульсов двигательных установок ДУ КБ и ДУ ТСМ;

б) при вращении связки (КБ - трос - ТСМ - КМ) возникают центробежные силы, зависящие от угловой скорости, масс КБ и связки (ТСМ-КМ), приводящие к значительной силе натяжения троса, что приводит к необходимости увеличения его прочности за счёт увеличения массы;

в) стабилизация (торможение) связки (КБ - трос - ТСМ - КМ) при стягивании троса требует затрат топлива как на КБ, так и на ТСМ;

д) использование других систем захвата типа сеть, гарпун практически невозможно из-за проблем стыковки в единую "жесткую" систему механической связки (КБ - ТСМ - КМ) с центром масс, лежащим на линии, совпадающей с продольной осью КБ для "толкающей" схемы.

В статье [1] Trushlyakov V., Yudinsev V. Systems engineering design and optimization of an active debris removal mission of a spent rocket body using piggyback autonomous module//3-rd IAA Conf. Dyn. Control Sp. Syst. (DYCOSS 2017) 30 May - 1-st June 2017. Moscow, 2017. pp. 667-681 приведены угловые скорости системы (КБ - трос - ТСМ - КМ) при стягивании связки, а также силы, действующие на трос.

Эти недостатки могут быть устранены в том случае, если в известный способ добавить следующие действия, в результате чего получим Способ увода объектов КМ, основанного на использовании КБ, отделившегося от него на тросе ТСМ и стыковки с КМ отличающийся тем, что

1.1) за счёт различия орбитальных скоростей (КБ с ТСМ) и КМ, используя ТСМ для доставки троса А от КБ к КМ, на этапе ближнего наведения формируют вращающуюся тросовую систему (ТС1), включающую в свой состав КБ - трос - ТСМ, с жесткой механической связью между с КМ (например, штанга-конус или манипулятор) или вращающуюся тросовую систему (ТС2), включающую в свой состав КБ - трос А - ТСМ, с тросовой связью (трос Б) между ТСМ и КМ (например, сеть или гарпун на тросовой связке).

1.2а) после формирования вращающейся ТС1 (ТС2), непрерывно определяют её угловое положение на орбите по отношению к вектору орбитальной скорости её центра масс и для увеличения высоты орбиты центра масс ТС1 (ТС2) прилагают импульс ДУ КБ, направленной вдоль линии троса в сторону центра масс ТС1 (ТС2), на интервале углового положения ТС1 (ТС2), соответствующего положительной величине проекции импульса ДУ КБ на вектор скорости центра масс ТС1 (ТС2), а для уменьшения высоты орбиты центра масс ТС1 (ТС2) импульс ДУ КБ прилагают на интервале углового положения ТС1 (ТС2), соответствующего отрицательной проекции импульса ДУ КБ на вектор орбитальной скорости центра масс ТС1 (ТС2);

1.2б) после формирования вращающейся ТС1 (ТС2), непрерывно определяют её угловое положение на орбите по отношению к вектору орбитальной скорости её центра масс и с целью сокращения затрат топлива КБ для уменьшения перигея орбиты центра масс ТС1 (ТС2) импульс ДУ КБ прилагают на интервале углового положения ТС1 (ТС2), соответствующего отрицательной проекции импульса ДУ КБ на вектор орбитальной скорости центра масс ТС1 (ТС2) при высоте орбиты ТС1 (ТС2) близкой к высоте апогея;

1.3а) управление натяжением троса А, соединяющего КБ с ТСМ, от момента формирования жесткой связи между ТСМ и КМ, до момента отделения КМ от ТСМ, осуществляют изменением длины троса А для обеспечения гарантированного натяжения троса А с учётом действия на КБ силы тяги, натяжения

троса А от вращения ТС1 вокруг её центра масс, а также для демпфирования возможных продольных колебаний троса А, при этом сила натяжения троса А не должна превышать предельного значения, определяемого свойствами материала троса А, и прочностью элементов конструкций, обеспечивающих крепление троса А к ТСМ и КБ и соединение ТСМ с КМ;

1.3б) управление натяжением тросов А, Б, соединяющего КБ с ТСМ и ТСМ с КМ, соответственно, осуществляют путём изменения длин тросов А, Б для обеспечения гарантированного их натяжения с учётом действия на КБ силы тяги ДУ КБ, натяжения тросов А, Б от вращения ТС2 вокруг центра масс, демпфирования возможных продольных колебаний тросов, колебаний ТСМ относительно линии, соединяющей центры масс КМ и КБ, и отсутствия в ТС2 резонансных явлений, при этом сила натяжения тросов А, Б не должна превышать предельного значения, определяемого свойствами материалов тросов А, Б, и прочностью элементов конструкций, обеспечивающих крепление тросов А, Б к ТСМ и КБ, КМ соответственно и соединение ТСМ с КМ;

1.4а) при достижении центром масс ТС1 заданной области околоземного пространства и заданной орбитальной скорости движения КМ осуществляют отделение КМ путём разрыва жёсткой механической связи между ТСМ и КМ;

1.4б) при достижении центром масс ТС2 заданной области околоземного пространства и заданной скорости движения КМ осуществляют отделение КМ путём разрыва жёсткой механической связи между ТСМ и тросом Б;

1.5) после отделения КМ осуществляют торможение вращения связки (КБ - трос А - ТСМ), стягивание в единую жёсткую связку и манёвра связки (КБ - ТСМ) к следующему объекту КМ.

Устройства для реализации способа

2а) Тросовая система 1, включающая в свой состав КБ, управляемый тросовый барабан А, трос А, отделяемый на тросе А ТСМ с системой стыковки с КМ, отличающаяся тем, что КБ оснащён ДУ с возможностью обработки продольных импульсов по "толкающей" схеме, ТСМ оснащён декартовой ДУ и системой жёсткой стыковки и захвата типа "штырь-конус" или "робот-рука".

2.б) Тросовая система 2, включающая в свой состав КБ, управляемый тросовый барабан А, трос А, ТСМ с системой стыковки с КМ, отличающаяся тем, что КБ оснащён ДУ с возможностью обработки продольных импульсов по "толкающей" схеме, в состав ТСМ вводят управляемый тросовый барабан Б, жёстко связанный с ТСМ, трос Б, систему крепления троса Б с ТСМ на основе разрывных болтов, электрически связанную с ТСМ, отделяемую от ТСМ на тросе Б систему захвата типа гарпун, сеть.

Реализация способа и устройств

Для иллюстрации способа по п.1.1а и 1.1б на фиг. 1 приведена схема, на которой обозначены: 1 - КБ, 2 - КМ, 3 - ТСМ, 4 - трос А, соединяющий ТСМ с КБ, 5 - жёсткая или нежёсткая (трос Б) механическая связь, соединяющий ТСМ с КМ, 6 - центр масс ТС1 (ТС2), включающей КБ, ТСМ и КМ, 7 - сила тяги ДУ КБ, 8 - орбита движения центра масс 6 ТС1 (ТС2) вокруг Земли - 9, 10 - траектория движения КБ 1 относительно центра масс 6 ТС1 (ТС2), 11 - активный участок АВ траектории 10 движения КБ относительно центра масс 6 ТС1 (ТС2), на котором производится включение ДУ КБ для изменения орбиты ТС1 (ТС2).

На фиг. 2 в качестве примера приведены характерный график изменения высоты апогея и высоты перигея орбиты ТС1, вращающейся с угловой скоростью величиной 2 градуса в секунду в плоскости орбиты ТС1, с массой КМ 4500 кг, массой ТСМ 500 кг, массой КБ 5000 кг, соединённых тросом А длиной 2000 м, при действии на ТС1 силы тяги КБ 1000 Н при отрицательной проекции тяги КБ на направление скорости центра масс 6 ТС1.

На фиг. 3 приведена схема тросовой системы на момент отделения КМ от ТСМ, на которой обозначены 12 - центр масс КМ, 13 - траектория движения центра масс КМ, обеспечивающая его падение в заданную точку на поверхности Земли 9.

На фиг. 4 приведена конструкция ТС1, которая включает в свой состав управляемый тросовый барабан А 14 для возможности изменения длины троса А 4, ТСМ 3 с декартовой ДУ 15 и системой стыковки 16, формирующей жёсткую разделяемую механическую типа "штырь-конус", "робот-рука" с КМ 2. Для изменения орбиты ТС1 КБ оснащён ДУ 17 с возможностью обработки продольных импульсов по "толкающей" схеме - импульсов направленных вдоль троса А от КБ к центру масс 6 вращающейся ТС1.

На фиг. 5 приведена конструкция ТС2, отличающаяся от конструкции ТС1, тем, что на ТСМ 3 устанавливается система захвата 19, формирующей нежёсткую механическую связь КМ 2 с ТСМ 3 типа гарпун или сеть посредством троса Б 5 (на фиг. 5 показан один из возможных вариантов нежёсткой механической связи сформированной при помощи сети). В состав ТСМ 3 включён управляемый тросовый барабан Б 18 для управления длиной троса Б (5), являющегося частью системы захвата 19, систему разделения механической связи 20 на основе пироболтов (пирозамков) 21 между тросом Б 5 и барабаном ТСМ 18 для отделения КМ с тросом Б, электрически связанную 22 с ТСМ3.

На фиг. 6 показаны этапы увода космического мусора. После отделения от носителя КБ 1 с ТСМ 3 выводятся на орбиту близкую к орбите выбранного КМ 2 так, чтобы скорость орбитального движения КБ с ТСМ в точке наибольшего сближения отличалась на величину достаточную для раскрутки тросовой системы до необходимой угловой скорости (фиг. 6а).

ТСМ 3 отделяется от КБ 1 на тросовой связи и, используя свою ДУ, сближается с КМ (фиг. 6б) и захватывает его, формируя между КМ и ТСМ жёсткую или нежёсткую механическую связь (фиг. 6в).

Разница орбитальных скоростей КМ и КБ приводит к начальной закрутке тросовой системы вокруг её центра масс 6. После стабилизации углового движения КБ 1 и ТСМ 3 с КМ 2 относительно троса А 4, управляя длиной троса А 4, обеспечивают вращение тросовой системы с заданной угловой скоростью для обеспечения натяжения троса А при действии на тросовую систему тяги ДУ КБ 1 для изменения орбиты тросовой системы (фиг. 6г).

При достижении заданной области околоземного пространства, управляя длиной троса А, формируют условия отделения КМ для требуемого движения центра масс КМ и выполняют отделение КМ.

Для отделения КМ от ТС1 разывают жёсткую механическую связь 16 (фиг. 4) между ТСМ 3 и КМ 2.

Для отделения КМ от ТС2 разывают механическую связь 20 между ТСМ 3 и тросом Б 5, путём средства разделения (разрывные болты, пирозамки), электрические связанные с ТСМ 3.

После разрыва механической связи ТСМ с КМ, с использованием троса А ТСМ возвращается на КБ для захвата и увода следующего КМ (фиг. 6е).

Описание способа

1.1) Определяют активный участок 11 ТС1 (ТС2), как множество угловых положений на орбите движения 8 её центра масс 6 по отношению к вектору скорости V , определяемых углом φ , для приложения к ТС1 (ТС2) силы тяги ДУ КБ 7, направленной вдоль линии троса А 4 в сторону связки (ТСМ - КМ), для изменения скорости V центра масс 6 ТС1 (ТС2) для требуемого изменения параметров её орбиты.

В системе координат ОХУ, связанной с плоскостью орбиты связки, координатный столбец вектора приращения скорости центра масс ТС1 (ТС2), вращающейся в плоскости орбиты, при постоянном уровне тяги КБ Р будет определяться следующим матричным выражением:

$$\Delta V^o = \begin{bmatrix} \Delta V_x^o \\ \Delta V_y^o \end{bmatrix} = -\frac{P}{m} \int_0^{\Delta t} \begin{pmatrix} \cos \vartheta & -\sin \vartheta \\ \sin \vartheta & \cos \vartheta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos \varphi \\ \sin \varphi \end{pmatrix} dt =$$

$$= -\frac{P}{m} \int_0^{\Delta t} \begin{bmatrix} \cos \vartheta \cos \varphi & -\sin \vartheta \sin \varphi \\ \sin \vartheta \cos \varphi & \cos \vartheta \sin \varphi \end{bmatrix} dt \quad (1)$$

где φ - угол между вектором силы тяги 7 КБ 1, совпадающим с линией троса А 4, и направлением вектора скорости центра масс 6 ТС1, ТС2 (для рассматриваемого примера полагаем, что направления тросов А и Б параллельны), который для постоянной угловой скорости вращения ТС1, ТС2 определяется выражением

$$\varphi = \varphi_0 + \omega t, \quad (2)$$

ω - угловая скорость вращения ТС1, ТС2 вокруг центра масс 5, φ_0 - начальный угол между вектором силы тяги ДУ и вектором орбитальной скорости центра масс 6, ϑ - угол истинной аномалии, определяющий ориентацию орбитальной подвижной системы координат Sx_0y_0 относительно неподвижной перигейной системы координат ОХУ:

$$\vartheta = \vartheta_0 + nt, \quad (3)$$

ϑ_0 - начальное значение угла истинной аномалии, $n = \sqrt{\mu/r^3}$ - среднее движение - угловая скорость орбитального движения связки по круговой орбите 8, μ - гравитационный параметр Земли, m - суммарная масса ТС1 (ТС2), φ_0 - (фиг. 1), Δt - продолжительность работы ДУ КБ 1 с момента прохождения ТС1 (ТС2) положения $\varphi = \varphi_0$ до момента, когда угол между вектором силы тяги ДУ и вектором орбитальной скорости ТС1 (ТС2) станет равен φ_k :

$$\Delta t = \frac{\varphi_k - \varphi_0}{\omega} \quad (4)$$

Подставляя (2) и (3) в (1), получим

$$\Delta V^o = \frac{P}{m(n + \omega)} \begin{bmatrix} \sin(\varphi_0 + \vartheta_0) - \sin(\varphi_k + \vartheta_0) \\ \cos(\varphi_k + \vartheta_0) - \cos(\varphi_0 + \vartheta_0) \end{bmatrix} \quad (5)$$

В орбитальной подвижной системе координат, зафиксированной в момент $t = 0$, проекции приращения вектора скорости центра масс ТС1 (ТС2) 6 будут определяться следующим образом:

$$\Delta V^c = \frac{P}{m(n + \omega)} \begin{bmatrix} \sin \varphi_0 - \sin \varphi_k \\ \cos \varphi_k - \cos \varphi_0 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Угловая скорость ω ТС1 (ТС2) имеет порядок единицы градуса в секунду, что значительно превышает угловую скорость орбитального движения центра масс 6 ТС1 (ТС2) n , что позволяет упростить выражение (6)

$$\Delta V^c = \frac{P}{m \omega} \begin{bmatrix} \sin \varphi_0 - \sin \varphi_k \\ \cos \varphi_k - \cos \varphi_0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Для уменьшения высоты орбиты ТС1 (ТС2) ДУ КБ 1 включается на части 11 траектории движения 10 КБ 1 относительно центра масс 6 ТС1 (ТС2) при ориентации ТС1 (ТС2), обеспечивающей отрицательную проекцию вектора силы тяги 7 КБ 1 на направление вектора орбитальной скорости (фиг. 1)

$$\vec{P} \cdot \vec{V} = -|P||V| \cos \varphi < 0. \quad (8)$$

Это достигается при $\varphi_0 = -\pi/2$ и $\varphi_k = \pi/2$. Используя выражение (7), получим величину тормозного импульса

$$\Delta V = \frac{2P}{m(n + \omega)}, \quad (9)$$

Направление вектора ΔV (при $\omega \gg n$) будет противоположным вектору орбитальной скорости в момент включения ДУ КБ.

Например, для силы тяги $P = 1$ кН (100 кгс), массы ТС1 (ТС2) $m = 10$ т и угловой скорости вращения ТС1 (ТС2) $\omega = 2^\circ/\text{с}$, изменение скорости за один оборот связки вокруг центра масс 6 будет равен:

$$\Delta V \approx \frac{2 \cdot 1 \text{ кН}}{10000 \text{ кг} \cdot 2^\circ/\text{с}} \approx 5,7 \text{ м/с}. \quad (10)$$

За один орбитальный период ТС1 (ТС2) количество включений ДУ КБ 1 будет определяться отношением угловых скоростей вращения ТС1 (ТС2) и её движения по орбите:

$$N_p = \frac{\omega}{n} \quad (11)$$

Для указанных выше значений и начальной высоты орбиты $h = 800$ км

$$N_p = \frac{\omega}{\sqrt{\frac{\mu}{R^3}}} = \frac{2^\circ/\text{с}}{\sqrt{\frac{\mu}{(6371 \text{ км} + 800 \text{ км})^3}}} \approx \frac{0,0349 \text{ с}^{-1}}{0,00104 \text{ с}^{-1}} \approx 33 \quad (12)$$

Многочисленное включение ДУ КБ 1 в течение орбитального периода ТС1 (ТС2) приведёт к снижению высоты орбиты через один орбитальный период до 450 км. Дальнейшая работа ДУ КБ по указанному алгоритму приведёт к снижению высоты орбиты ТС1 (ТС2) до границы атмосферы в течение 2 орбитальных периодов. На фиг. 2 показано изменение высоты апогея и перигея орбиты ТС1 (ТС2) для указанных выше параметров. Затраты топлива за один орбитальный период составят

$$\Delta m_T = \frac{P}{I_s} N_p \Delta t \approx \frac{1000 \text{ Н}}{3000 \text{ м/с}} 33 \cdot 90 \text{ с} \approx 990 \text{ кг}. \quad (13)$$

где I_s - удельный импульс ДУ КБ.

1.2а) Сила натяжения троса А должна быть не больше величины $T^{\max}$, определяемой из условия целостности троса А, конструкции узлов крепления троса А к КБ, ТСМ:

$$T < T^{\max}$$

В частности, сила натяжения троса А не должна превышать предельное натяжение троса А, определяемое из условия его прочности

$$T^{\max} < [\sigma]S$$

где S - площадь поперечного сечения троса А, $[\sigma]$ - допускаемое напряжение на растяжение материала троса А.

При этом должно обеспечивается натяжение троса А при действии силы тяги КБ 1. Для угловой скорости ω движения ТС1 КБ - ТСМ - КМ вокруг общего центра масс 6 сила натяжения троса А T_0 при отсутствии тяги 7 КБ 1 определяется следующим образом:

$$T_0 = \frac{c m_{\text{пр}} \omega^2 l}{c - m_{\text{пр}} \omega^2} \quad (14)$$

где l - длина ТС1 (от центра масс КБ до центра масс КМ), $m_{\text{пр}}$ - приведённая масса ТС1

$$m_{\text{пр}} = \frac{m_{\text{КБ}}(m_{\text{ТСМ}} + m_{\text{КМ}})}{m}, \quad (15)$$

$m_{\text{КБ}}$ - масса КБ, $m_{\text{КМ}}$ - масса КМ, $m_{\text{ТСМ}}$ - масса ТСМ, $m = m_{\text{КБ}} + m_{\text{ТСМ}} + m_{\text{КМ}}$ - масса ТС1, массой троса А пренебрегаем.

Для указанного выше примера ТС1 сила натяжения троса А - T_0 при жёсткости троса А $c_A = EF/l = 350 \text{ Н/м}$, выполненного из кевлара диаметром 3 мм, будет равна

$$T_0 = \frac{350 \text{ Н/м} \cdot 2500 \text{ кг} \cdot (2^\circ/\text{с})^2 \cdot 2000 \text{ м}}{350 \text{ Н/м} - 2500 \text{ кг} \cdot (2^\circ/\text{с})^2} \approx 6,15 \text{ кН} \quad (16)$$

При действии силы тяги КБ 1 стационарное значение силы натяжения троса А (после затухания продольных колебаний троса А) будет равно

$$T_p = \frac{c_A(l\omega^2 m_{\text{КБ}} - P)m_{\text{КМ}}}{c_A(m_{\text{КБ}} + m_{\text{КМ}}) - \omega^2 m_{\text{КБ}}m_{\text{КМ}}}, \quad (17)$$

Минимальное значение силы натяжения троса А при действии силы P с учётом коэффициента динамичности (Бабаков И.М. Теория колебаний - М.: Наука, 1968) приближённо можно оценить следующим образом:

$$T_p = T_0 - \frac{2P(m_{\text{КМ}} + m_{\text{ТСМ}})}{m} > 0, \quad (18)$$

Для того чтобы сила натяжения троса всегда была больше нуля, необходимо выполнение условия

$$P < \frac{T_0 m}{2(m_{\text{КМ}} + m_{\text{ТСМ}})} \quad (19)$$

В частности, из условия (19) следует, что при близких массах КБ и КМ с ТСМ ($m_{\text{КМ}} + m_{\text{ТСМ}} = m_{\text{КБ}}$) сила натяжения троса должна быть больше силы тяги ДУ КБ

$$T_0 > P \quad (20)$$

Из условия (19) можно выразить требование к угловой скорости вращения ТС1

$$\omega > \sqrt{\frac{2m}{c_A l m_{\text{КБ}} + (c_A l + 2P)(m_{\text{КМ}} + m_{\text{ТСМ}}) m_{\text{КБ}}}} \frac{P c_A}{m_{\text{КБ}}} \quad (21)$$

Например, при $m_{\text{КБ}} = 5000$ кг, $m_{\text{КМ}} = 4500$ кг, $m_{\text{ТСМ}} = 500$ кг приведённая масса связки равна

$$m_{\text{пр}} = \frac{5000 \text{ кг}(500 \text{ кг} + 4500 \text{ кг})}{5000 \text{ кг} + 500 \text{ кг} + 4500 \text{ кг}} = 2500 \text{ кг}. \quad (22)$$

Угловая скорость связки при длине троса А $l = 2$ км и силе тяги ДУ КБ $P = 1$ кН, должна быть не менее $0,8^\circ/\text{с}$.

1.26) При нежёсткой связи между ТСМ и КМ необходимо также контролировать натяжение гибкой связи (трос Б). Сила натяжения троса Б должна быть не больше величины T^{max} , определяемой из условия целостности троса Б, конструкции узлов крепления троса Б к КМ и ТСМ.

При вращении ТС2 и отсутствии действия на ТС2 силы тяги КБ 1 сила натяжения троса А, соединяющего КБ 1 с ТСМ 3, будет определяться следующим образом:

$$T_A = c_A \frac{l \omega^2 m_{\text{КБ}} (c_B m_{\text{КМ}} + (k - \omega^2 m_{\text{КМ}}) m_{\text{ТСМ}})}{\omega^2 m_{\text{КБ}} (\omega^2 m_{\text{КМ}} m_{\text{ТСМ}} - c_B m_B) + c_A (-\omega^2 m_{\text{КМ}} m_A + c_B m)}. \quad (23)$$

где $m_A = m_{\text{КБ}} + m_{\text{ТСМ}}$, $m_B = m_{\text{КМ}} + m_{\text{ТСМ}}$, c_A - жёсткость троса А, соединяющего КБ с ТСМ, c_B - жёсткость троса Б, соединяющего ТСМ с КМ, $k = l_A/l$ - отношение длины троса А к длине всей ТС2 ($l = l_A + l_B$), l_A - длина троса А (от центра масс КБ до центра масс ТСМ), l_B - длина троса Б (от центра масс ТСМ до центра масс КМ). Сила натяжения троса Б, соединяющего ТСМ с КМ

$$T_B = c_B \frac{l \omega^2 m_{\text{КМ}} (c_A m_{\text{КБ}} + (k - 1)(\omega^2 m_{\text{КБ}} - c_A) m_{\text{ТСМ}})}{\omega^2 m_{\text{КБ}} (\omega^2 m_{\text{КМ}} m_{\text{ТСМ}} - c_B m_B) + c_A (-\omega^2 m_{\text{КМ}} m_A + c_B m)}. \quad (24)$$

После включения ДУ КБ сила натяжения тросов А и Б изменится. Предполагая, что суммарная длина ТС2 под действием силы Р изменится незначительно, что не приведёт к значительному изменению угловой скорости ТС2, силы натяжения тросов после успокоения продольных колебаний тросов, будут определяться следующим образом:

$$T_A = c_A \frac{c_B (l \omega^2 m_{\text{КБ}} - P) m_{\text{КМ}} + (P - k l \omega^2 m_{\text{КБ}}) (\omega^2 m_{\text{КМ}} - c_B) m_{\text{ТСМ}}}{\omega^2 m_{\text{КБ}} (\omega^2 m_{\text{КМ}} m_{\text{ТСМ}} - c_B m_B) + c_A (c_B m - \omega^2 m_{\text{КМ}} m_A)}. \quad (25)$$

$$T_B = c_B \frac{m_{\text{КМ}} ((k - 1) l \omega^4 m_{\text{КБ}} m_{\text{ТСМ}} + c_A (l \omega^2 (m_{\text{КБ}} - (k - 1) m_{\text{ТСМ}}) - P))}{\omega^2 m_{\text{КБ}} (\omega^2 m_{\text{КМ}} m_{\text{ТСМ}} - c_B m_B) + c_A (c_B m - \omega^2 m_{\text{КМ}} m_A)}. \quad (26)$$

Для ТС2 с длиной троса А $l_A = 2000$ м, троса Б - $l_B = 50$ м, $c_A = EF/l_A = 350$ Н/м, $c_B = EF/l_B = 14000$ Н/м, начальной угловой скорости $\omega = 2^\circ/\text{с}$, $m_{\text{КБ}} = 5000$ кг, $m_{\text{КМ}} = 4500$ кг, $m_{\text{ТСМ}} = 500$ кг, начальная сила натяжения тросов А и Б

$$T_A = 6,29 \text{ кН}, \quad T_B = 5,68 \text{ кН}.$$

После включения ДУ КБ установившаяся сила натяжения тросов А и Б:

$$T_A = 5,78 \text{ кН}, \quad T_B = 5,23 \text{ кН},$$

при этом длина ТС2 после включения ДУ КБ уменьшится на 1,5 м, что составляет менее 0,1% от начальной длины ТС2.

1.4) отделение КМ от ТСМ осуществляют при достижении ТС1 (ТС2) заданной области околоземного пространства для спуска КМ 2 в заданную область земной поверхности 9 (например, для затопления в несудоходной области Мирового океана), при этом управляя длиной троса А, Б и моментом разделения КМ и ТСМ обеспечивают движение КМ с начальной скоростью

$$\mathbf{V}_{\text{КМ}} = \mathbf{V} + \mathbf{u}_d$$

обеспечивающей требуемые начальные условия входа КМ 2 в плотные слои атмосферы, где u_d - скорость движения центра масс 12 КМ относительно центра масс 6 ТС1 (ТС2)

$$\mathbf{u}_{\text{КМ}} = \boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{\rho}_{\text{КМ}}$$

$\boldsymbol{\rho}_{\text{КМ}}$ - радиус-вектор соединяющий центр 6 масс ТС1 (ТС2) с центром масс 12 КМ 2 в момент разделения КМ 2 и ТСМ 3 (фиг. 3).

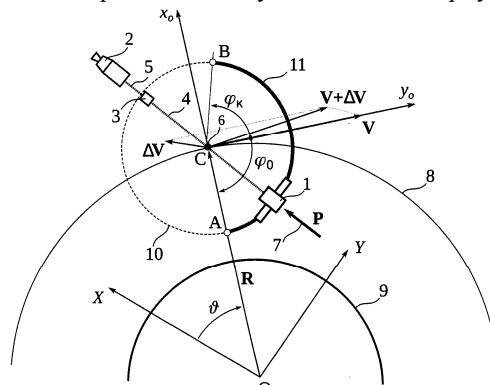
ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Способ увода объектов крупногабаритного космического мусора (КМ), основанный на использовании космического буксира (КБ), отделяющегося от него на тросе транспортно-стыковочного модуля

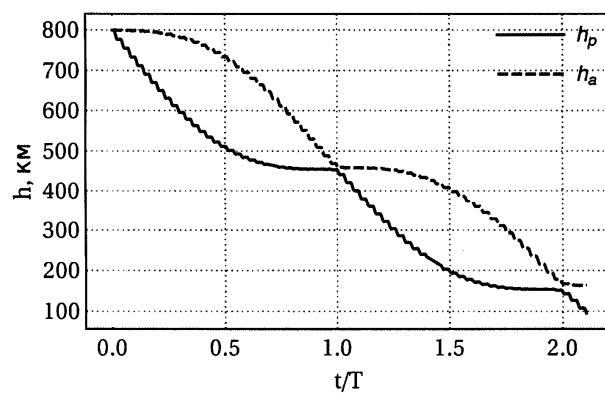
(ТСМ) и стыковки с КМ, отличающийся тем, что за счёт различия орбитальных скоростей (КБ с ТСМ) и КМ, используя ТСМ для доставки троса А от КБ к КМ, на этапе ближнего наведения формируют вращающуюся тросовую систему (ТС1), включающую в свой состав КБ - трос А - ТСМ, с жёсткой механической связью между ТСМ и КМ или вращающуюся тросовую систему (ТС2), включающую в свой состав КБ - трос А - ТСМ, с тросовой связью (трос Б) между ТСМ и КМ после формирования вращающейся ТС1 (ТС2), определяют её угловое положение на орбите по отношению к вектору орбитальной скорости её центра масс и для увеличения высоты орбиты центра масс прикладывают импульс двигательной установки (ДУ) КБ, направленной вдоль линии троса А в сторону центра масс ТС1 (ТС2), на интервале углового положения ТС1 (ТС2), соответствующего положительной величине проекции импульса ДУ КБ на вектор орбитальной скорости центра масс ТС1 (ТС2), а для уменьшения высоты орбиты центра масс импульс ДУ КБ прикладывают на интервале углового положения ТС1 (ТС2), соответствующего отрицательной величине проекции импульса ДУ КБ на вектор орбитальной скорости центра масс ТС1 (ТС2), управление натяжением троса А, соединяющего КБ с ТСМ, от момента формирования жёсткой связи между ТСМ и КМ, до момента отделения КМ от ТСМ, осуществляют изменением длины троса А для обеспечения гарантированного натяжения троса А с учётом действия на КБ силы тяги, силы натяжения троса А от вращения ТС1 вокруг её центра масс, а также для демпфирования возможных продольных колебаний троса А, при этом сила натяжения троса А не должна превышать предельного значения, определяемого свойствами материала троса А, и прочностью элементов конструкций, обеспечивающих крепление троса А к ТСМ и КБ и соединение ТСМ с КМ, управление натяжением тросов А, Б, соединяющего КБ с ТСМ и ТСМ с КМ соответственно, осуществляют путём изменения длин тросов А, Б для обеспечения гарантированного их натяжения с учётом действия на КБ силы тяги ДУ КБ, натяжения тросов А, Б от вращения ТС2 вокруг центра масс, демпфирования возможных продольных колебаний тросов, колебаний ТСМ относительно линии, соединяющей центры масс КМ и КБ, и отсутствия в ТС2 резонансных явлений, при этом сила натяжения тросов А, Б не должна превышать предельного значения, определяемого свойствами материалов тросов А, Б, и прочностью элементов конструкций, обеспечивающих крепление тросов А, Б к ТСМ и КБ, КМ соответственно, и соединение ТСМ с КМ, при достижении центром масс ТС1 заданной области околоземного пространства и заданной орбитальной скорости движения КМ осуществляют отделение КМ путём разрыва жёсткой механической связи между ТСМ и КМ, при достижении центром масс ТС2 заданной области околоземного пространства и заданной орбитальной скорости движения КМ осуществляют отделение КМ путём разрыва жёсткой механической связи между ТСМ и тросом Б, после отделения КМ осуществляют торможение вращения связки (КБ - трос А - ТСМ), стягивание в единую жёсткую связку и манёвр связки (КБ - ТСМ) к следующему объекту КМ.

2. Способ по п.1, в котором ТСМ в ТС1 оснащён декартовой ДУ и системой жёсткой стыковки и захвата типа "штырь-конус" или "робот-рука".

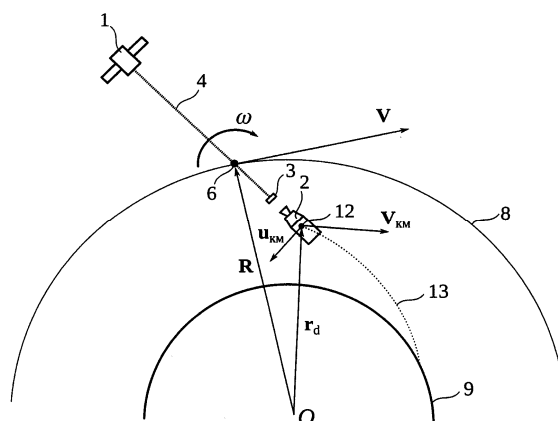
3. Способ по п.2, в котором в состав ТСМ в ТС2 входит управляемый тросовый барабан Б, жёстко связанный с ТСМ, трос Б, система крепления троса Б с ТСМ на основе разрывных болтов, электрически связанная с ТСМ, отделяемая от ТСМ на тросе Б систему захвата типа гарпун, сеть.



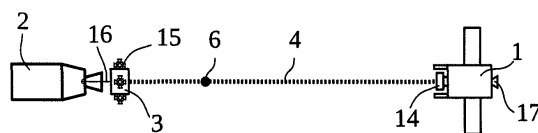
Фиг. 1



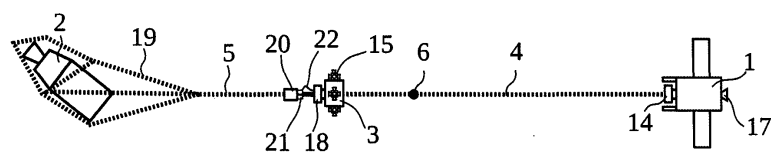
Фиг. 2



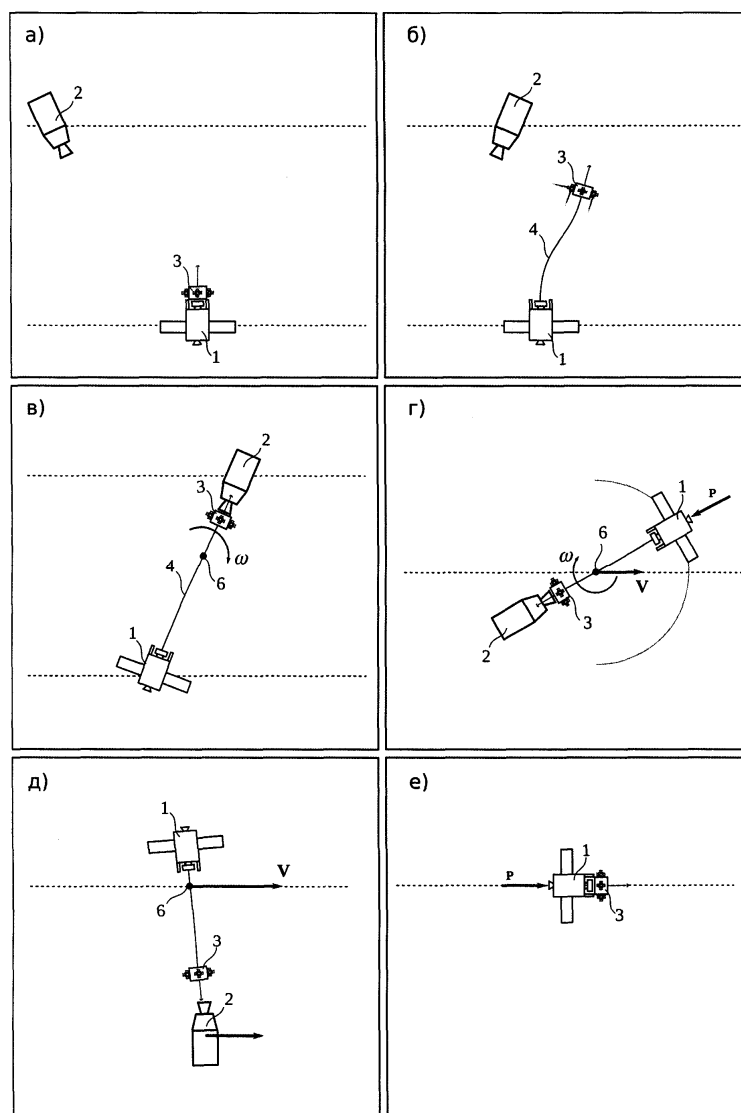
Фиг. 3



Фиг. 4



Фиг. 5



Фиг. 6

