

Определение параметров оснащенной гарпуном тросовой системы для буксировки космического мусора

Асланов В.С.*, Алексеев А.В., Ледков А.С.*****

Самарский национальный исследовательский университет

имени академика С.П. Королева, Московское шоссе, 34, Самара, 443086,

Россия

**e-mail: aslanov_vs@mail.ru*

***e-mail: alexeeff05@mail.ru*

****e-mail: ledkov@inbox.ru*

Аннотация

В работе исследуется процесс уборки космического мусора при помощи тросовой системы. Рассматривается этап захвата космического мусора при помощи гарпуна и этап начала буксировки. Система состоит из буксира, снабженного двигателем малой тяги, пассивного объекта – космического мусора, моделируемого протяженным твердым телом тяжелее буксира, и упругого троса. Построена математическая модель и определены возмущения, возникающие из-за воздействия гарпуна. В результате проведения численных экспериментов найдены границы параметров системы буксировки, позволяющие осуществлять безопасный захват и последующий увод с орбиты пассивного объекта. Результаты работы могут быть использованы для создания новых систем уборки космического мусора.

Ключевые слова: космический мусор, космическая тросовая система, уравнения движения, стыковка, гарпун, хаос.

Постановка задачи

Одним из актуальных и перспективных направлений космической деятельности является решение проблемы уборки космического мусора. В настоящее время на околоземной орбите находится большое количество нефункционирующих спутников и ступеней ракет, которые затрудняют размещение на орбите новых космических аппаратов и создают серьезную угрозу для уже работающих [1, 2]. Существующие исследования показывают, что игнорирование проблемы космического мусора приведет к возникновению эффекта Кесслера. В результате взаимных столкновений крупногабаритного космического мусора на орбите образуется облако мелких осколков, что сделает невозможным дальнейшую космическую деятельность [3, 4]. Для недопущения в ближайшем будущем эффекта Кесслера необходимо уводить с орбиты, по крайней мере, пять крупных объектов в год [5].

В настоящее время в научной литературе обсуждается несколько способов уборки космического мусора. Хороший обзор возможных решений дан в статье [6]. Весьма перспективными выглядят системы уборки, основанные на использовании активного космического аппарата-буксира с тросовой системой [10, 11, 12]. Предполагается, что космический аппарат подлетает к космическому мусору, осуществляет его захват, затем включает двигатель и уводит его с орбиты. При этом большую сложность представляет этап захвата космического мусора. Среди

обсуждаемых в научной литературе способов захвата можно выделить роботизированные манипуляторы, гарпуны, сети и устройства мягкой стыковки [13].

В рамках данного исследования предполагается, что в качестве устройства для захвата используется гарпун, который пробивает обшивку космического мусора и застревает в ней. Использование гарпуна позволяет осуществлять захват на ненулевых относительных скоростях и не требует наличия на уводимом с орбиты объекте стыковочного модуля, что позволяет его использовать для захвата объектов различного типа [13]. К недостаткам этого способа можно отнести тот факт, что при пробивке обшивки космическому мусору сообщается момент ударного импульса относительно его центра масс, в результате чего объект приобретает дополнительную угловую скорость. Кроме того, начало этапа буксировки связано с процессом неоднократного натягивания и ослабления упругого троса. В результате трос может передавать тягу буксира нерегулярно, что может привести к «раскачке» буксируемого объекта до больших амплитуд и даже к вращению [11, 14]. Переход буксируемого объекта во вращение может произойти и не в результате возмущения от гарпуна, а под действием периодических колебаний упругого троса [15]. Режим вращения является недопустимым для рассматриваемой схемы увода, поскольку он может привести к наматыванию троса на буксируемый объект и к его разрыву. Следовательно, система буксировки должна быть построена таким образом, чтобы заранее исключить возможность возникновения этого опасного режима.

В настоящей работе будем рассматривать этап захвата космического мусора гарпуном и начало этапа торможения. Предполагается, что буксир движется по той же орбите, что и космический мусор, отставая на некоторое расстояние, равное

длине троса. До попадания гарпуна космический мусор был гравитационно стабилизирован. Чтобы рассмотреть наиболее неблагоприятный вариант, будем считать, что гарпун попал в наиболее удаленную от центра масс буксируемого объекта точку. В этом случае уводимый объект приобретает максимальную угловую скорость. Сразу после захвата буксир включает тягу, направленную вдоль местной горизонтали противоположно движению системы.

Целью настоящей работы является определение параметров тросовой системы, обеспечивающих безопасную буксировку космического мусора после пробивания его гарпуном.

Для достижения цели будет построена математическая модель движения системы, состоящей из буксира, буксируемого объекта и упругого троса (рис. 1); выбраны начальные условия движения системы в зависимости от орбиты, параметров буксируемого объекта, параметров гарпуна и условий его попадания; выбраны параметры системы буксировки, определяющие режим движения буксируемого объекта относительно центра масс.

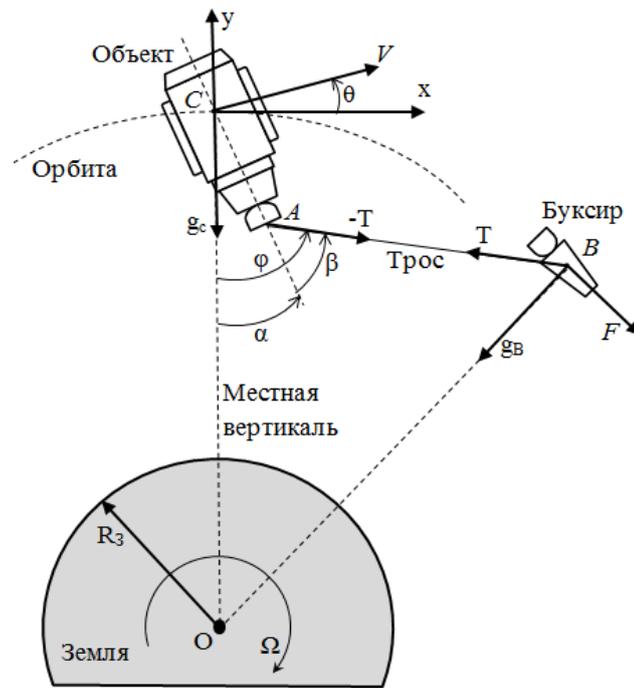


Рис. 1 – Связка буксир-объект

Математическая модель

Рассмотрим механическую систему, показанную на рис. 1. Система состоит из буксируемого объекта с центром масс в точке C , троса AB и буксира B , который рассматривается как материальная точка. Следуя [16], запишем уравнения движения центра масс буксируемого объекта в геоцентрической системе координат в скалярном виде:

$$\begin{aligned}
 \dot{V} &= -g_c \sin \theta - \frac{T}{m_c} \sin(\theta - \varphi), \\
 \dot{\theta} &= \Omega - \frac{1}{V} \left(g_c \cos \theta + \frac{T}{m_c} \cos(\theta - \varphi) \right), \\
 \dot{H} &= V \sin \theta, \\
 \dot{L} &= \frac{R_3}{R_3 + H} V \cos \theta,
 \end{aligned} \tag{1}$$

и уравнение движения буксира в связанной с центром масс буксируемого объекта системе координат S_{xy} :

$$m_B \vec{W}_B^r = \vec{F} + \vec{T} + m_B \vec{g}_B + \vec{\Phi}_e + \vec{\Phi}_K, \quad (2)$$

где R_3 - радиус Земли, H, L - высота и дальность полета; $\Omega = V \cos \theta / r_C$ - угловая скорость вращения буксируемого объекта по орбите, $\vec{r}_C = \overrightarrow{OC}$, $\vec{\rho}_B = \overrightarrow{CB}$, V - скорость точки C , θ - угол наклона траектории, m_C, m_B - соответственно, масса буксируемого объекта и буксира; \vec{W}_B^r - относительное ускорение буксира; \vec{g}_C, \vec{g}_B - соответственно, ускорение свободного падения на высоте буксируемого объекта и на высоте груза; \vec{F} - сила тяги буксира, направленная вдоль местной горизонтали; \vec{T} - сила натяжения троса, которая для гибкого упругого троса является кусочно-заданной функцией:

$$T = \begin{cases} c(\rho - l), & \rho \geq l; \\ 0, & \rho < l, \end{cases} \quad (3)$$

где ρ - актуальная (текущая) длина троса, l - длина троса в недеформируемом состоянии, $c = \frac{ES}{l}$ - коэффициент упругости троса, который вычисляется через модуль Юнга материала E , площадь сечения S . Переносная $\vec{\Phi}_e$ и кориолисова $\vec{\Phi}_K$ силы инерции определяются по формулам:

$$\vec{\Phi}_e = -m_B \left(\vec{W}_C + \dot{\vec{\Omega}} \times \vec{\rho}_B + \vec{\Omega} \times (\vec{\Omega} \times \vec{\rho}_B) \right), \quad \vec{\Phi}_K = -2m_B \vec{\Omega} \times \dot{\vec{\rho}}_B.$$

Для упрощения уравнений относительного движения буксира введем ряд допущений. Поскольку радиус орбиты буксируемого объекта существенно превышает длину троса, будем считать, что ускорения свободного падения \vec{g}_C и \vec{g}_B

одинаковые. Пусть масса буксируемого объекта существенно превосходит массу буксира, тогда: $1/m_B + 1/m_C \approx 1/m_B$. Для орбиты буксируемого объекта близкой к круговой с точностью до величин порядка ρ_B/r_C можно показать, сгруппировав гравитационные и центробежные члены, что [17]:

$$\vec{g}_B - \vec{g}_C + \vec{\Omega} \times (\vec{\Omega} \times \vec{\rho}_B) \approx \begin{pmatrix} 0 \\ 3\Omega^2 y \end{pmatrix}, \quad \dot{\Omega} \approx \frac{\dot{V} \cos \theta}{R_3 + H}.$$

С учетом этих допущений, запишем векторное уравнение относительного движения буксира (2) в скалярном виде:

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= -\frac{T}{m_B} \sin \varphi - \dot{\Omega} y - 2\Omega \dot{y} + F, \\ \ddot{y} &= \frac{T}{m_B} \cos \varphi + \dot{\Omega} x + 3\Omega^2 y + 2\Omega \dot{x}. \end{aligned} \quad (4)$$

В системе (4) перейдем к новым переменным ρ , φ с помощью замены:

$$\begin{aligned} x &= \rho \sin \varphi + \Delta \sin \alpha, \\ y &= -\rho \cos \varphi - \Delta \cos \alpha, \end{aligned}$$

где $\rho = AB$ – длина троса, φ – угол отклонения троса от вертикали, $\Delta = CA$ (рис. 1).

Тогда уравнения, описывающие движение буксира с учетом движения буксируемого объекта вокруг центра масс в переменных ρ , φ , примут вид:

$$\begin{aligned} \ddot{\rho} &= -2\Omega \rho \dot{\varphi} - \frac{T}{m_B} + 3\Omega^2 \rho \cos^2 \varphi + \rho \dot{\varphi}^2 + F \sin \varphi + \\ &\quad + \Delta \left((\ddot{\alpha} - \dot{\Omega}) \sin(\alpha - \varphi) + (\dot{\alpha}^2 - 2\dot{\alpha}\Omega) \cos(\alpha - \varphi) + 3\Omega^2 \cos \alpha \cos \varphi \right), \\ \ddot{\varphi} &= 2\Omega \frac{\dot{\rho}}{\rho} + \dot{\Omega} - \frac{F}{\rho} \cos \varphi - 3\Omega^2 \cos \varphi \sin \varphi - 2\dot{\varphi} \frac{\dot{\rho}}{\rho} + \\ &\quad + \frac{\Delta}{\rho} \left((\dot{\Omega} - \ddot{\alpha}) \cos(\alpha - \varphi) + (\dot{\alpha}^2 - 2\dot{\alpha}\Omega) \sin(\alpha - \varphi) - 3\Omega^2 \cos \alpha \sin \varphi \right). \end{aligned} \quad (5)$$

Для вывода уравнения, описывающего движение буксируемого объекта относительно его центра масс, воспользуемся теоремой об изменении кинетического момента в проекции на ось Cz , перпендикулярно плоскости движения Cxy (рис. 1):

$$\dot{K}_z = M_T + M_G, \quad (6)$$

где $K_z = J_z(\dot{\alpha} - \Omega)$ – кинетический момент буксируемого объекта относительно оси Cz , $M_T = T\Delta \sin(\varphi - \alpha)$ – момент силы натяжения троса, $M_G = 3n^2(J_x - J_y)\sin \alpha \cos \alpha$ – гравитационный момент [18], где J_x, J_y, J_z – главные компоненты тензора инерции буксируемого объекта; $n = \sqrt{\gamma M / (R_3 + H)^3}$; γ – универсальная гравитационная постоянная, M – масса Земли. Тогда для орбиты буксируемого объекта, близкой к круговой ($\Omega = const$), уравнение (6) примет вид:

$$J_z \ddot{\alpha} = T\Delta \sin(\varphi - \alpha) + 3n^2(J_x - J_y)\sin \alpha \cos \alpha. \quad (7)$$

Окончательно уравнение движения буксируемого объекта относительно центра масс под действием момента силы натяжения троса и гравитационного момента можно записать следующим образом:

$$\ddot{\alpha} = \omega^2 \sin(\varphi - \alpha) + \kappa \sin 2\alpha, \quad (8)$$

где $\omega^2 = T(t)\Delta / J_z$, $\kappa = \frac{3}{2}n^2(J_x - J_y) / J_z$.

Уравнения (1), (5) и (8) описывают движение тросовой системы с учетом вращения буксируемого объекта относительно его центра масс.

Определение начальных условий после захвата гарпуном

В связи со спецификой решаемой задачи, определим начальные условия движения. На рис. 2 показано начальное положение системы. Так как движение системы необходимо замедлить, то тяга буксира направлена против направления движения.

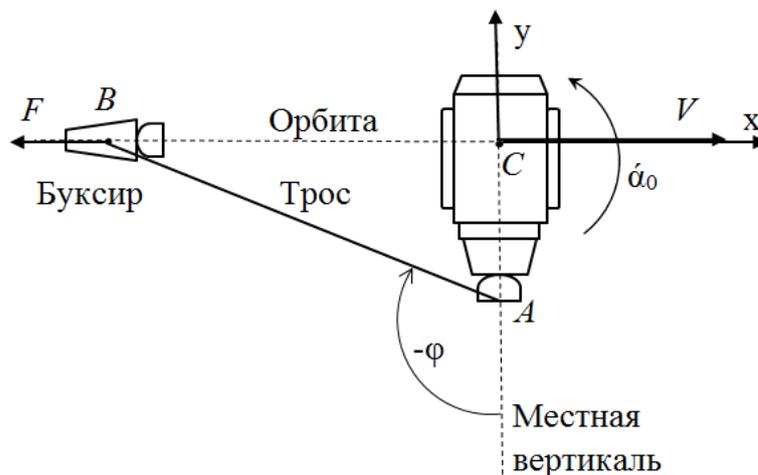


Рис. 2 – Начальное положение системы

Примем, что буксируемый объект движется по круговой орбите на высоте H , с первой космической скоростью $V = \sqrt{\frac{\gamma M}{R_3 + H}}$, направленной по касательной к орбите, то есть $\theta(0) = 0$; начальное значение высоты орбиты примем $H_0 = 500 \text{ км}$ - высота, на которой сосредоточено большое количество космического мусора; начальное значение дальности для решаемой задачи роли не играет, поэтому примем её нулевой $L(0) = 0$.

При этом до начала миссии буксируемый объект был стабилизирован гравитационным моментом вдоль местной вертикали, то есть $\alpha(0) = 0$. В момент

попадания гарпуна буксируемый объект получил некоторую положительную угловую скорость $\dot{\alpha}(0) = \dot{\alpha}_0 > 0$. На основании классических трудов [19] и [20] получена приближенная оценка необходимой скорости гарпуна для пробивания обшивки космического мусора и достаточно прочного закрепления в зависимости от его массы (рис. 3), где v – скорость гарпуна относительно пробиваемой оболочки; m – масса гарпуна; y_0 – отношение диаметра концевой части гарпуна к диаметру корневой части гарпуна: $y_0 = 0$ – конус, $y_0 = 0,5$ – усеченный конус, $y_0 = 1$ – цилиндр. Будем рассматривать наиболее негативный случай, когда буксируемому объекту придается максимальная начальная угловая скорость. Как видно из графика (рис. 3), наибольшее количество движения, а, следовательно, и импульс, придаваемый гарпуном буксируемому объекту, возникает в случае использования максимально тяжелого гарпуна ($m = 4 \text{ кг}$) с цилиндрической вонзаемой частью со скоростью $v = 35 \text{ м/с}$.

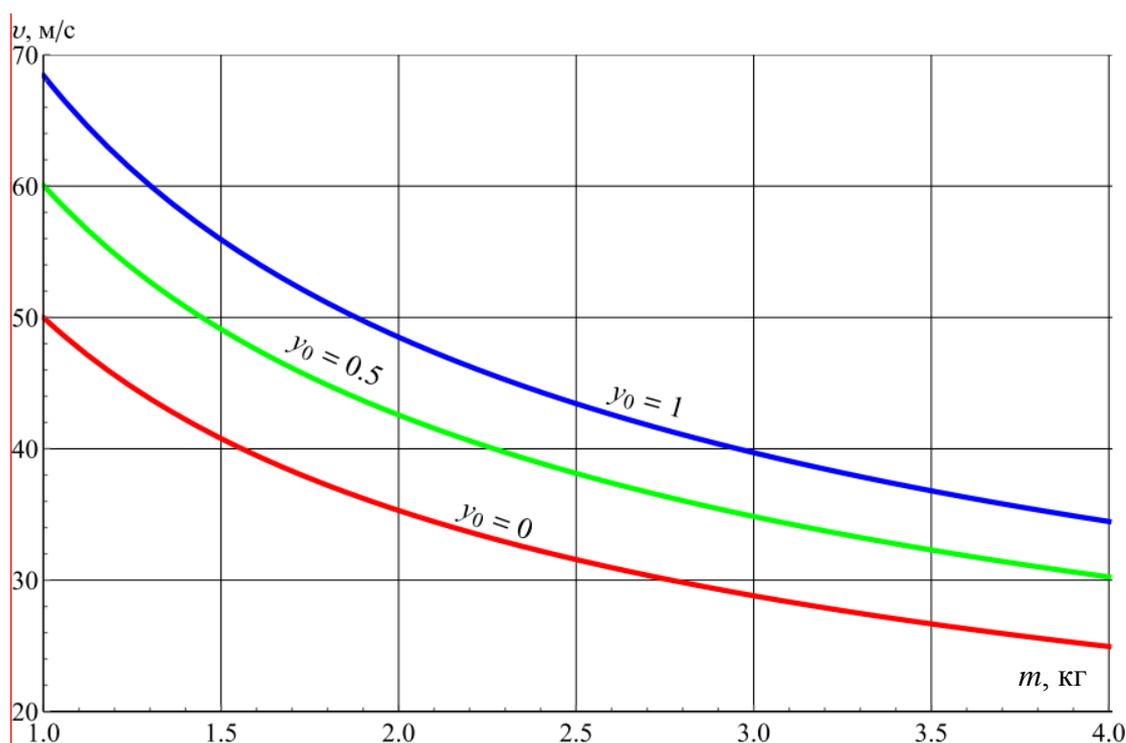


Рис. 3 – Зависимость необходимой скорости гарпуна от его массы при различных формах вонзаемой части

Кроме импульса, придаваемого буксируемому объекту гарпуном, на начальную скорость оказывает влияние расстояние точки крепления троса от центра масс буксируемого объекта (точка попадания гарпуна), которое является вероятностной величиной. В качестве буксируемого объекта примем, например, вторую ступень космического аппарата «Космос-3М», который после отработки остается на орбите в качестве космического мусора. Максимальное отклонение точки крепления троса от центра масс для такого объекта может составлять $\Delta = 4$ м. Таким образом, при наиболее неблагоприятном сценарии буксируемый объект при попадании гарпуна получает приращение кинетического момента:

$$\Delta K = m v \Delta,$$

что соответствует приобретению начальной угловой скорости буксируемого объекта:

$$\omega_0^{BO} = \frac{\Delta K}{J_z}. \quad (9)$$

Начальную длину троса примем равной длине троса в недеформируемом состоянии: $\rho(0) = l$. Так как цель миссии – замедлить движение БО, и буксир движется по той же орбите за БО (если смотреть по скорости движения системы), то начальный угол отклонения троса от вертикали определяется по формуле:

$$\varphi(0) = -\frac{\pi}{2} - \operatorname{arctg} \frac{\Delta}{l}.$$

Численный эксперимент

Для достижения поставленной цели проинтегрируем полученные выше уравнения движения (1), (5) и (8) при выведенных начальных условиях и параметрах второй ступени «Космос-3М» [21]: $m_c = 1434 \text{ кг}$, $J_x = 1285 \text{ кг м}^2$, $J_y = 6829 \text{ кг м}^2$, $J_z = 6812 \text{ кг м}^2$. Начальную угловую скорость определим по формуле (9):

$$\omega_0^{BO} = \frac{\Delta K}{J_z} = \frac{560}{6812} \approx 0,082 \text{ рад/с},$$

округлим полученный результат и будем считать начальную скорость движения буксируемого объекта $\dot{\alpha}_0 = 0,1 \text{ рад/с}$.

При проведении численного эксперимента будем варьировать следующие параметры системы: тяга буксира F , масса буксира m_B и длина троса l .

Например, для случая $F = 1,5 \text{ Н}$, $m_B = 250 \text{ кг}$, $l = 1000 \text{ м}$, получаем фазовый портрет (зависимость угловой скорости от угла поворота буксируемого объекта), изображенный на рис. 4. Полученный фазовый портрет соответствует колебаниям буксируемого объекта около устойчивого положения равновесия $\alpha \approx -\pi/2 \text{ рад}$, что позволяет передавать тягу буксира через трос и замедлять движение космического мусора по орбите в штатном режиме без наматывания троса.

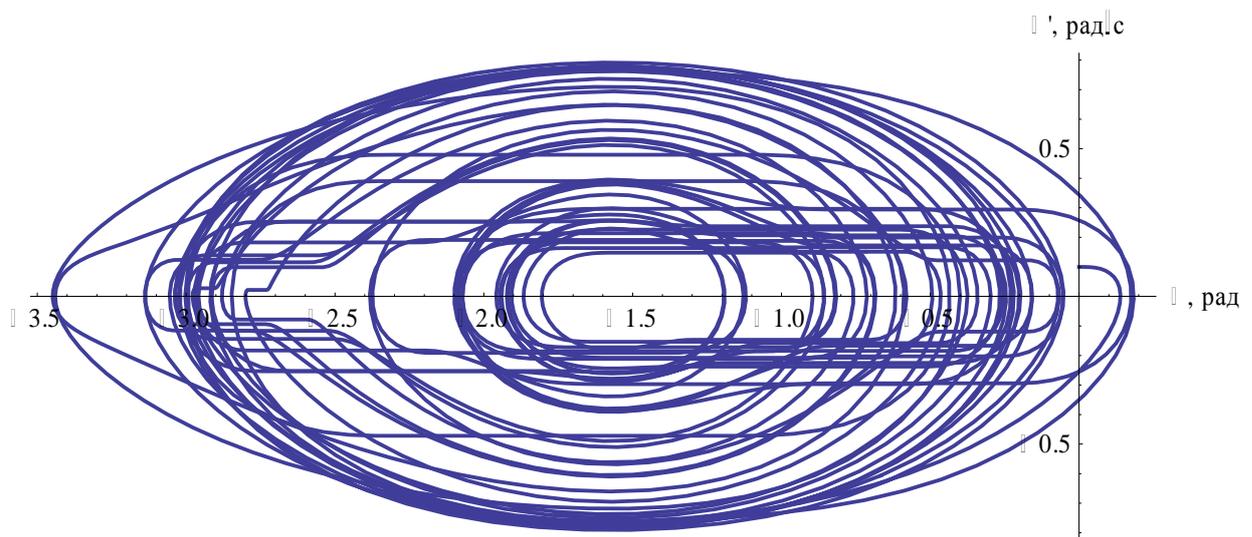


Рис. 4 – Фазовый портрет движения БО при $l = 1000 \text{ м}$

Если принять длину троса $l = 5000 \text{ м}$, не меняя остальных параметров системы, получим фазовый портрет (рис. 5), показывающий, что буксируемый объект помимо колебательных движений совершает и полные повороты вокруг центра масс, что недопустимо для буксировки. В этом случае трос может намотаться на буксируемый объект.

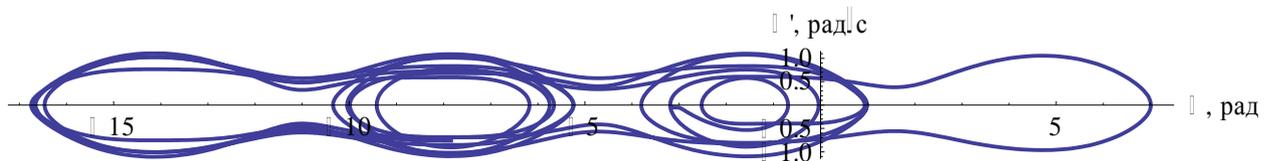


Рис. 5 – Фазовый портрет движения буксируемого объекта $l = 5000 \text{ м}$

Осуществляя серию численных экспериментов, получим границу на плоскости параметров m_B и l для тяги $F = 1,5H$ (рис. 6), которая разделяет два режима движения буксируемого объекта: допустимый – колебания буксируемого объекта, недопустимый – вращение буксируемого объекта. На рис. 6 точки 1 и 2 соответствуют параметрам, принятым для выше проведенных численных экспериментов $l = 1000 \text{ м}$ и $l = 5000 \text{ м}$.

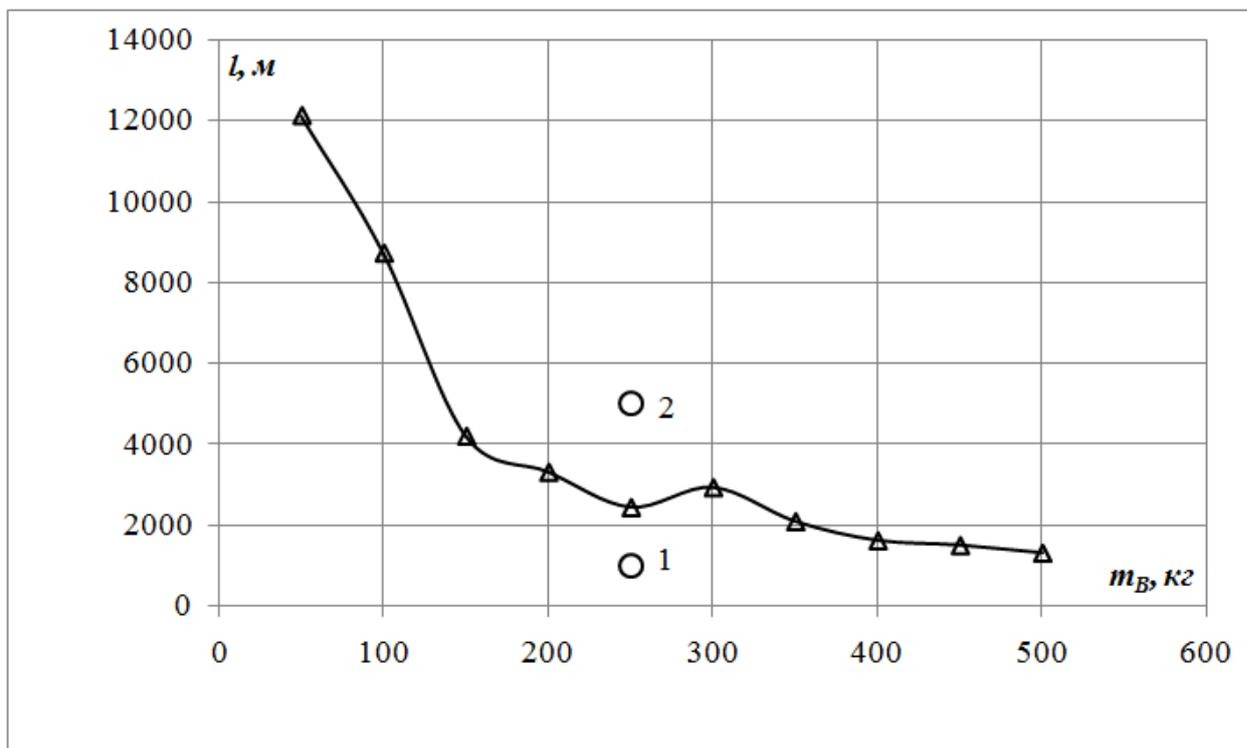


Рис. 6 – Граница, разделяющая режимы движения буксируемого объекта при

$$F = 1,5H$$

Таким образом, сочетание параметров, для которых изображающая точка будет лежать ниже границы, обеспечивают колебательный характер движения буксируемого объекта и не приводит к накрутке троса на него. Сочетание параметров с изображающей точкой выше границы приводит к вращению буксируемого объекта вокруг центра масс, что приводит к наматыванию троса, и является недопустимым.

В современной космической технике применяются двигатели малой тяги, обеспечивающие силу тяги в пределах от $0,5 H$ до $40 H$. На рис. 7 приведены границы, разделяющие режимы движения буксируемого объекта для нескольких значений силы тяги (сплошные линии).

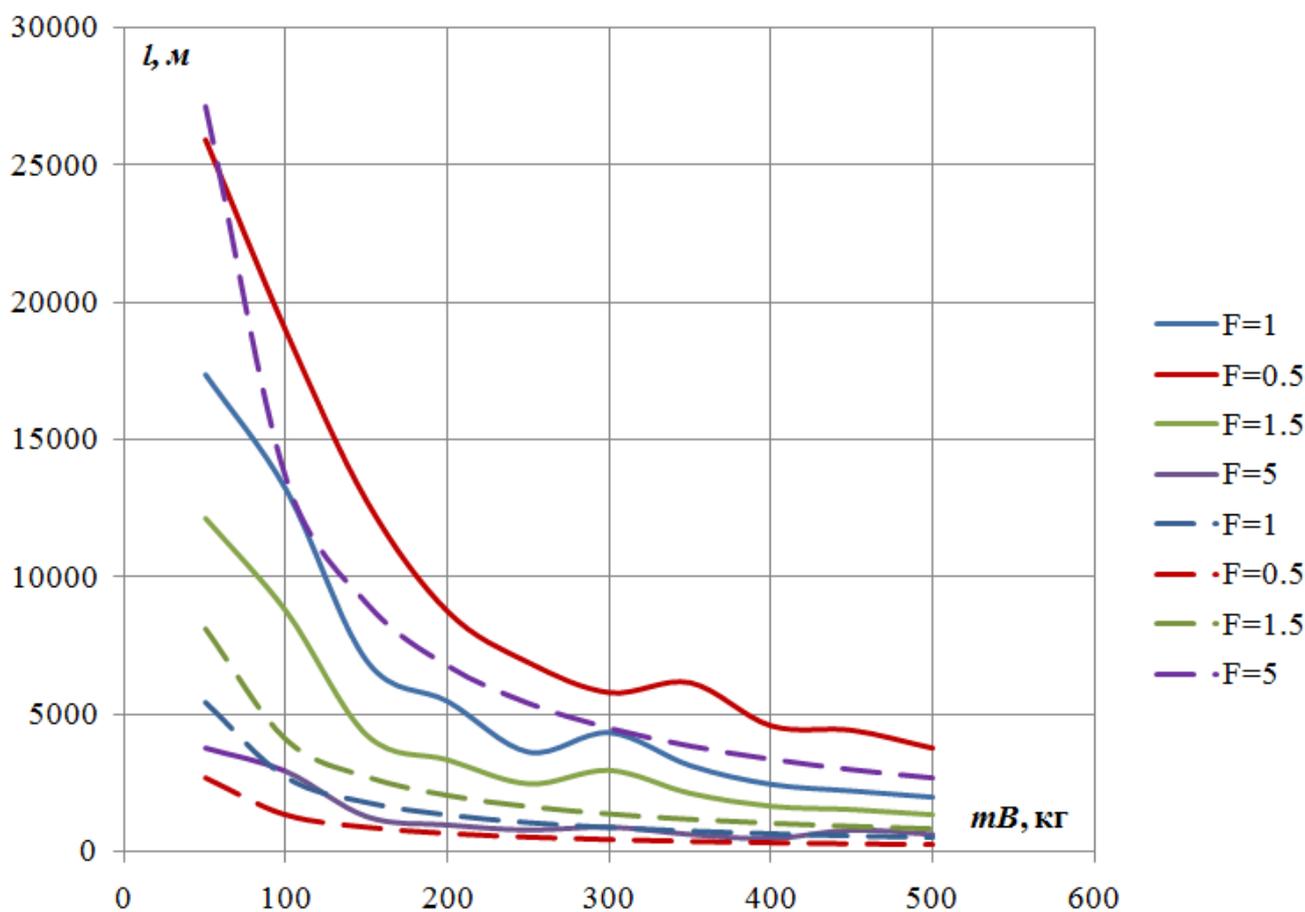


Рис. 7 – Границы, разделяющие режимы движения буксируемого объекта (сплошные линии) и системы буксировки (пунктирные линии) при различных значениях тяги

Наблюдается понижение границы с увеличением тяги. Если снабдить буксир двигателем, который обеспечит наибольшую тягу, то можно использовать наиболее короткий трос, что в свою очередь дает большую управляемость системе, а также увеличивает вероятность попадания гарпуна в космический мусор. При этом, чем легче буксир, тем более длинный трос можно использовать и не выходить из зоны допустимого режима движения.

В статье [15] получена аналитическая зависимость параметров системы, которая позволяет без проведения большого количества численных экспериментов сделать вывод о регулярности движения всей космической тросовой системы под действием тяги и гравитационного момента, возникающего из-за разницы высот буксира и буксируемого объекта. Для регулярного движения необходимо соблюдение следующего условия:

$$a = \frac{F}{lm_b n^2} > 3. \quad (10)$$

На рис. 7, кроме границ, разделяющих режимы движения буксируемого объекта (сплошные линии), показаны границы регулярности движения тросовой системы, полученные из условия (10) (пунктирные линии), для различных значений тяги. Для регулярного движения тросовой системы изображающая точка должна находиться под соответствующей пунктирной линией. Если соотношение параметров такое, что изображающая точка лежит выше соответствующей пунктирной линии, то возможно появление хаоса, который может проявиться в переходе тросовой системы из режима колебания в режим вращения. Таким образом, для случаев со значениями тяги $F = 0,5H$, $F = 1H$ и $F = 1,5H$ параметры, обеспечивающие регулярное движение тросовой системы согласно условию (10), обеспечивают допустимые режимы движения буксируемого объекта. Для случаев со значением тяги $F = 5H$ и выше наблюдается обратная картина: при допустимом режиме движения буксируемого объекта тросовая система совершает регулярное движение.

На рис. 8 представлены границы разделения режимов движения буксируемого объекта и регулярности движения тросовой системы при $F = 2H$. Наблюдается пересечение линий. Таким образом, для величины тяги $F < 2H$ отсутствие хаоса в системе буксировки достигается выполнением условия (10); при значениях тяги $F > 2H$ регулярность движения всей системы буксировки обеспечивается параметрами системы, гарантирующими колебательный характер движения буксируемого объекта после пробивания гарпуном.

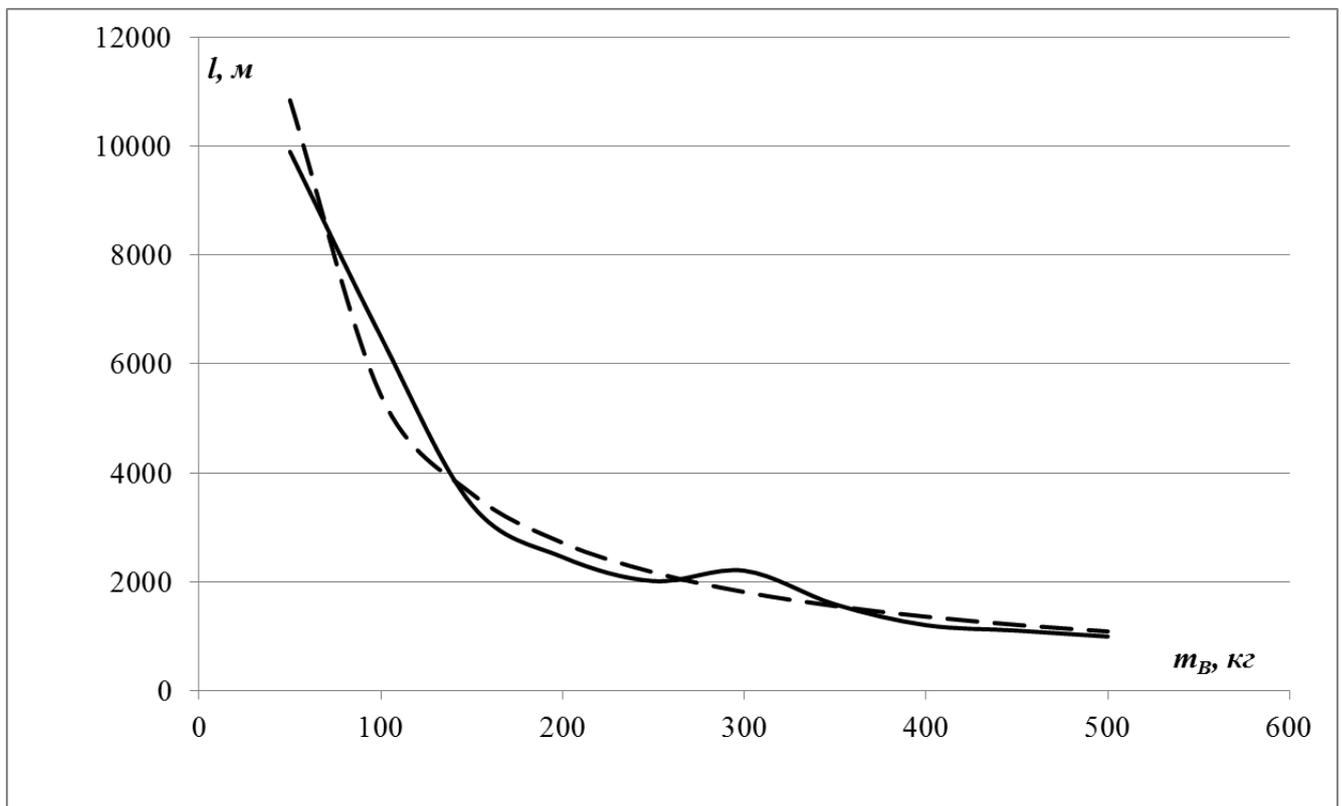


Рис. 8 – Границы, разделяющие режимы движения буксируемого объекта (сплошная линия) и регулярности движения тросовой системы (пунктирная линия) при $F = 2H$

Результаты и выводы

Таким образом, построена математическая модель движения тросовой системы, предназначенной для уборки космического мусора, которая учитывает возможные вращательные движения буксируемого объекта, а также провисание троса. Определены начальные условия движения системы при реализации наиболее неблагоприятного сценария пробивания обшивки буксируемого объекта гарпуном. Для различных значений тяги буксира построены границы, разделяющие область параметров масса-длина троса на зоны допустимых (ниже границ) и недопустимых (выше границ) режимов движения буксируемого объекта.

Кроме того, показано, что в случае малой тяги буксира перевод системы во вращение может произойти в результате перехода системы в хаотический режим [15]. В случае большой тяги, возможна закрутка буксируемого объекта в результате воздействия гарпуна и возникновением периодического возмущения от упругого троса. В этом случае условие (10) отсутствия хаоса является необходимым, но не достаточным условием для безопасной буксировки.

Полученные результаты позволяют осуществить выбор параметров системы буксировки, обеспечивающие безопасное движение системы после пробивания космического мусора гарпуном.

Представленные результаты получены в рамках выполнения государственного

задания Минобрнауки России №9.540.2014/К.

Библиографический список

1. Бордовицына Т.В., Александрова А.Г., Чувашов И.Н. Численное моделирование динамики околоземных космических объектов искусственного происхождения с использованием параллельных вычислений // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2011. № 4(16). С. 34-48.
2. Вениаминов С.С., Червонов А.М. Космический мусор - угроза человечеству // Механика. 2012. Т. 1. № 1. С. 2-191.
3. Kessler D.J., Cour-Palais B.G. Collision frequency of artificial satellites: the creation of a debris belt // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 1978, vol. 83. No. A6. С. 2637-2646.
4. Зеленцов В.В. Проблемы мелкого космического мусора // Наука и образование. 2015. № 04. С. 89–104.
5. Liou J.C., Johnson N.L., Hill N.M. Controlling the growth of future LEO debris populations with active debris removal // Acta Astronautica. 2010. Vol. 66. P. 648–653.
6. Shan M., Guo J., Gill E. Review and comparison of active space debris capturing and removal methods. Progress in Aerospace Sciences, 2016, vol. 80, pp. 18-32.
7. Ашурбейли И.Р., Лаговиер А.И., Игнатъев А.Б., Назаренко А.В. Возможности использования авиационной лазерной системы для борьбы с космическим мусором и поддержания орбит космического аппарата // Труды МАИ, 2011, №43: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=24856>

8. Авдеев А. В. К вопросу борьбы с космическим мусором с помощью лазерной космической установки на основе HF-НХЛ // Труды МАИ, 2012, №61: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=35496>
9. Phipps C.R., Baker K.L., Libby S.B., Liedahl D.A., Olivier S.S., Pleasance L.D., Rubenchik A., Trebes J.E., George E.V., Marcovici B., Reilly J.P., Valley M.T. Removing orbital debris with lasers// *Advances in Space Research*. 2012. vol. 49. iss. 9. P. 1283-1300. DOI: 10.1016/j.asr. 2012.02.003.
10. Aslanov V., Yudintsev V. Dynamics of large space debris removal using tethered space tug // *Acta Astronautica*. 2013. Vol. 91. P. 149-156.
11. Ледков А.С. Управление силой тяги при буксировке космического мусора на упругом тросе // *Наука и образование*. 2014. № 10. С. 383-397.
12. Nishida S.I. Space debris removal system using a small satellite // *Acta Astronautica*. 2009. Vol. 65. P. 95-102.
13. Трушляков В.И., Юткин Е.А. Обзор средств стыковки и захвата объектов крупногабаритного космического мусора // *Омский научный вестник*. 2013. № 2 (120). С. 56-61.
14. Aslanov V.S.; Ledkov, A.S. Dynamics of Towed Large Space Debris Taking Into Account Atmospheric Disturbance // *Acta Mechanica*. 2014. 9 (vol. 225), pp. 2685–2697.
15. Aslanov V.S. Chaos Behavior of Space Debris During Tethered Tow. // *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2016. Vol. 39, No 10 (2016), pp. 2399-2405.

16. Асланов В.С., Ледков А.С., Стратилатов Н.Р. Влияние тросовой системы, предназначенной для доставки груза на Землю, на вращательное движение космического аппарата // Полет. 2009. №1. С. 54-60.
17. Белецкий В.В., Левин Е.М. Динамика космических тросовых систем. – М.: Наука, 1990. – 329 с.
18. Белецкий В.В. Движение искусственного спутника относительно центра масс. – М.: Наука, 1965. – 416 с.
19. Зукас Д.А., Николас Т., Свифт Х.Ф. Динамика удара. – М.: МИР, 1985. – 296 с.
20. Сагомоян А.Я. Проникание. – М.: МГУ, 1974. – 301 с.
21. Jasper L.E.Z., Seubert C.R., Schaub H., Trushkyakov V., Yutkin E.: Tethered tug for large low earth orbit debris removal. In: AAS/AIAA Astrodynamics Specialists Conference Astrodynamics Conference, January 29–February 2, Charleston, South Carolina, AAS 12-252 (2012).