

УДК 531.37

Способ захвата космического мусора, обеспечивающий его безопасную тросовую буксировку

Сизов Д.А.*, Асланов В.С.**

*Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королева, Московское шоссе, 34, Самара, 443086, Россия*

**e-mail: sizov.syzran@gmail.com*

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

Статья поступила 24.10.2019

Аннотация

Рассматривается процесс уборки пассивной верхней ступени ракеты активным космическим аппаратом, состоящий из трех этапов: захват объекта гарпуном, разматывание троса, буксировка. Для снижения угловой скорости вращения объекта используется ударный импульс от гарпуна. Предложены алгоритм определения положения точки захвата на поверхности объекта и закон управления тягой буксира в ходе разматывания троса, обеспечивающие безопасную буксировку. В качестве примера использования предлагаемого подхода выполнено численное моделирование уборки верхней ступени ракеты Ariane 4. Результаты работы могут быть использованы для планирования будущих миссий по уборке космического мусора с низких околоземных орбит.

Ключевые слова: космический мусор, гарпун, захват, относительное движение, тросовая буксировка.

1. Введение

В настоящее время нефункционирующие искусственные спутники Земли — космический мусор — представляют собой серьезную угрозу для активных космических аппаратов. Одними из наиболее опасных нефункционирующих объектов являются верхние ступени ракет, причем не столько из-за того, что они имеют большие массу и габариты, делающие столкновение с ними весьма опасным, сколько по причине того, что ввиду наличия остатков топлива они могут самопроизвольно взрываться на орбите, порождая множество обломков с непредсказуемыми траекториями. В этой связи в последние годы предложено и проанализировано множество способов уборки космического мусора и в частности верхних ступеней ракет [1–9]. Одним из таких способов является тросовая буксировка пассивного космического мусора (объекта) активным аппаратом (буксиром) в верхние слои атмосферы. В качестве буксиров возможно использование как аппаратов с малой тягой [10–12], предполагающих длительную буксировку по спиральной траектории, так и разгонных блоков ракет [13], способных в считанные секунды снизить скорость объекта так, что он войдет в атмосферу в течение нескольких дней.

Тросовая буксировка предполагает использование средств захвата объекта. В этом качестве могут выступать сети или гарпуны, рассмотренные, например, в работах [14, 15]. При этом многие аспекты процесса захвата по-прежнему остаются неисследованными. В частности, точка приложения силы натяжения троса

к объекту может быть смещена относительно его центра масс как в продольном, так и в поперечном направлении, однако в работах [10–12] рассматривается только продольное смещение. Кроме того, для обеспечения точного попадания гарпуна или сети буксир должен находиться близко к объекту, а для безопасной буксировки — на существенном удалении. Поэтому требуется дополнительное исследование вращения объекта в то время, пока буксир, выполнив захват, будет удаляться от объекта, переходя в рабочее положение. При этом необходимо исключить наматывание троса на объект, для чего требуется замедлять его вращение. Известно несколько техник замедления, в том числе за счет использования натяжения троса [16] или вихревых токов [17]. Если до захвата угловая скорость вращения объекта мала, ее можно снизить за счет удара гарпуна [18]. Помимо теоретических исследований возможности использования гарпуна для захвата космического мусора, в последнее время проводились как наземные [19], так и космические эксперименты. В начале 2019 года в рамках проекта RemoveDebris [20] на МКС был произведен пробный выстрел гарпуном по удаленной на 1,5 м неподвижной цели, представлявшей собой пластинку 10 x 10 см из алюминиевых сот, которые часто используются в качестве обшивки спутников. Эксперимент прошел успешно, однако реальные космические объекты, которые предстоит захватывать, могут вращаться, и кроме того, к ним небезопасно подлетать на столь малое расстояние. Таким образом, этап захвата объекта и влияние параметров захвата на последующий этап буксировки изучены недостаточно.

Цель статьи - предложить способ уборки вращающегося космического мусора

с использованием гарпуна и тросовой буксировки с малой тягой, в котором гарпун служит не только для захвата, но и является средством снижения угловой скорости объекта.

Статья состоит из трех основных разделов: в разделе 2 приводится постановка задачи, в разделе 3 описаны используемые математические модели, в разделе 4 выполнено численное моделирование, которое иллюстрирует предложенный сценарий уборки.

2. Постановка задачи

В качестве объекта рассмотрим верхнюю ступень ракеты на низкой околоземной круговой орбите, вращающуюся в плоскости орбиты. Предполагается увод объекта с орбиты путем тросовой буксировки, но прежде буксир должен захватить объект гарпуном, а затем произвести разматывание троса. В ходе описанного процесса свойства системы изменяются, поэтому его целесообразно разбить на три этапа (рисунок 1): 1) захват; 2) разматывание троса; 3) буксировка.

На первом этапе для выполнения захвата объекта буксир приближается к нему на расстояние в несколько десятков метров, обеспечивающее, с одной стороны, достаточную точность попадания, с другой стороны, безопасность буксира. Затем в определенный момент он выстреливает гарпуном в объект. Трос на данном этапе не натянут.

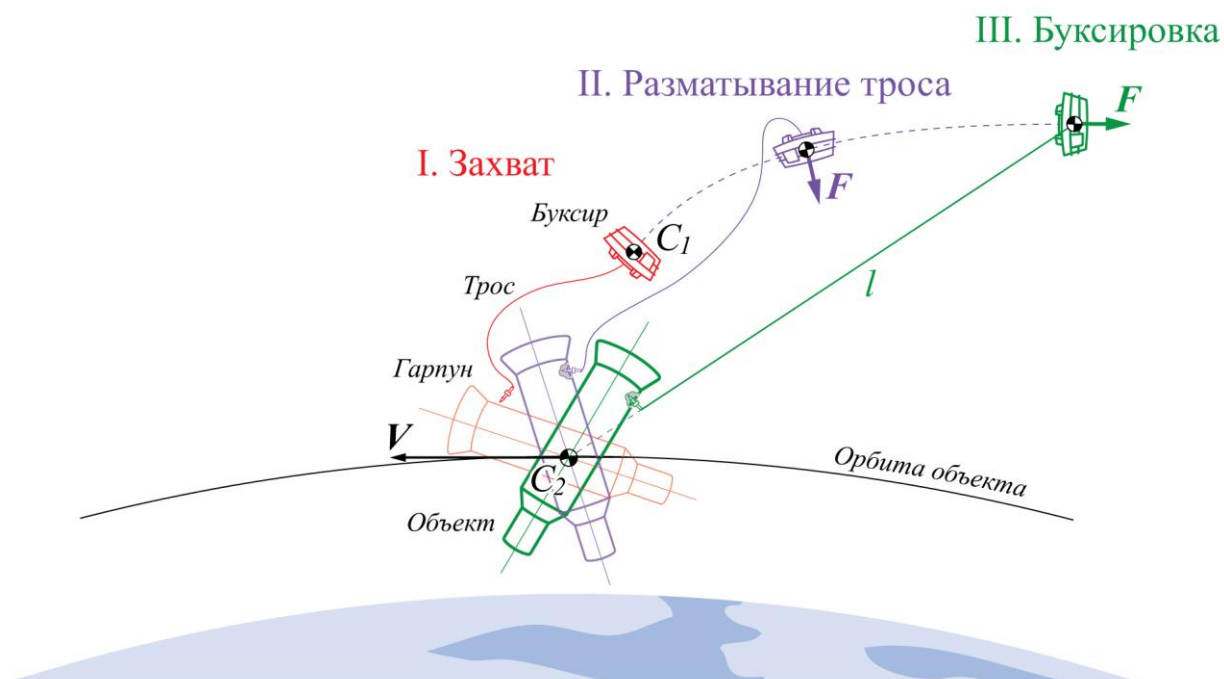


Рисунок 1 — Этапы процесса уборки

На втором этапе выполняется перевод системы в буксировочное состояние. Для этого буксир должен развить тягу и, разматывая трос, двигаться определенным образом, чтобы к моменту натяжения троса занять требуемое положение. Строго определенное положение к этому моменту должен занять и объект, поэтому большое значение имеет угловая скорость объекта после удара, зависящая от его угловой скорости до удара и от положения точки попадания гарпуна. Трос на данном этапе не натянут, поэтому движения буксира и объекта можно рассматривать по отдельности.

На третьем этапе осуществляется тросовая буксировка объекта. Ее безопаснее выполнять в положении, близком к положению устойчивого равновесия системы, когда при натянутом тросе буксир находится позади объекта и несколько ниже или выше него [11]. Достигнув заданного положения, буксир создает тягу вдоль

локальной горизонтали и уводит объект с орбиты.

3. Математические модели

3.1. Основные допущения

При выводе уравнений движения были сделаны следующие допущения:

1. Исходная орбита объекта является круговой.
2. Все движения происходят в плоскости орбиты объекта.
3. Буксир — материальная точка.
4. Трос невесомый и нерастяжимый.
5. Удар гарпуна абсолютно неупругий.
6. Скорость гарпуна в момент соударения достаточна для пробивания оболочки объекта.
7. Соприкасающиеся элементы объекта и гарпуна обладают прочностью, достаточной для фиксации гарпуна после пробивания.
8. Параметры орбиты объекта не изменяются после удара гарпуна.
9. Система находится в центральном ньютоновском гравитационном поле.
10. Влияние атмосферы отсутствует.

3.2. Оптимизация движения буксира при разматывании троса

На данном этапе рассматривается задача оптимизации управления буксиром, поскольку он должен попасть в заданную точку с нулевой скоростью относительно

объекта. В этом случае для моделирования движения относительно центра масс объекта удобно использовать уравнения относительного движения [21]

$$\ddot{x} = 3n^2x + 2n\dot{y} + a_x, \quad (1)$$

$$\ddot{y} = -2n\dot{x} + a_y, \quad (2)$$

где a_x и a_y — соответственно радиальный и касательный компоненты ускорения

буксира, $n = \sqrt{\frac{\mu}{r_0^3}}$ — среднее движение, μ — гравитационный параметр Земли, r_0 —

радиус орбиты объекта (базовой орбиты), x и y — координаты буксира C_1 относительно центра масс объекта C_2 . Координата x соответствует радиальному смещению объекта относительно базовой орбиты, координата y — смещению проекции положения буксира на базовую орбиту, измеренному от точки C_2 вдоль ее окружности (рисунок 2). Расстояние d от центра масс объекта до буксира равно

$$d = \sqrt{r_0^2 + (r_0 + x)^2 - 2r_0(r_0 + x)\cos\frac{y}{r_0}}, \quad (3)$$

а скорость удаления буксира определяется как

$$\dot{d} = \frac{(r_0 + x)\left(\dot{x} + \dot{y}\sin\frac{y}{r_0}\right) - r_0\dot{x}\cos\frac{y}{r_0}}{d}. \quad (4)$$

В момент, когда трос будет полностью размотан, т.е. $d = l$ (рисунок 2), буксир должен находиться в точке с координатами $(x_s; y_s)$,

$$x_s = R - r_0, \quad (5)$$

$$y_s = -r_0 \sin^{-1}\left(\frac{l \cos \alpha_s}{R}\right), \quad (6)$$

где R — расстояние от буксира до центра Земли C , $R = \sqrt{r_0^2 + l^2 - 2r_0l \cos\left(\frac{\pi}{2} + \alpha_s\right)}$,

l — длина троса, α_s — положение относительного равновесия троса [11], зависящее от массы буксира m_1 и его тяги F , принимаемой постоянной:

$$\alpha_s = \cos^{-1} \frac{F}{3lm_1n^2}. \quad (7)$$

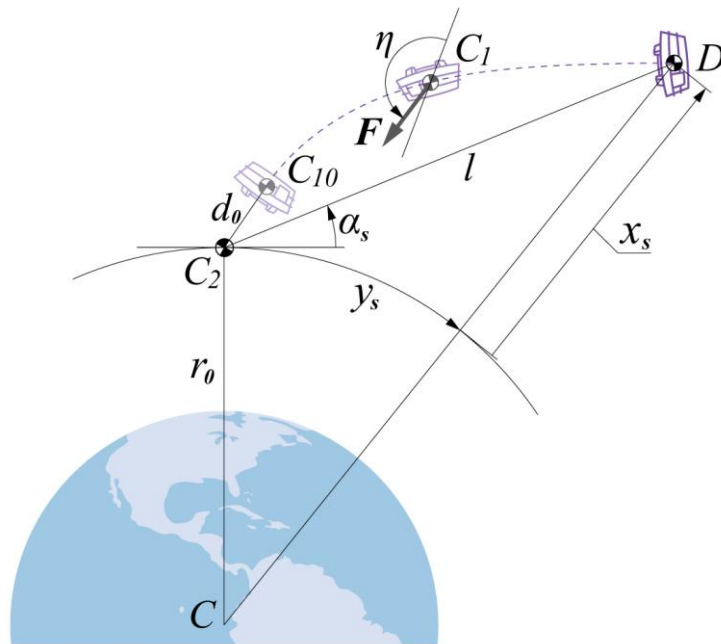


Рисунок 2 — Параметры относительного движения буксира

Сформулируем задачу выхода буксира в заданную точку с заданной относительной скоростью как задачу оптимального управления. Поскольку буксир должен оказаться в требуемой точке с нулевой относительной скоростью относительно центра масс объекта, введем подлежащую минимизации целевую функцию, зависящую от конечного расстояния между буксиром и заданной точкой, а также от его относительной скорости:

$$f = \max\left(w_1\left((x(T) - x_s)^2 + (y(T) - y_s)^2\right), w_2\left(\dot{x}(T)^2 + \dot{y}(T)^2\right)\right). \quad (8)$$

Здесь T — время разматывания троса, w_i — весовые коэффициенты, а величины x , y , \dot{x} , \dot{y} в момент времени T находятся из решения уравнений движения (1) и (2), в которых a_x и a_y зависят от выбранного закона управления. Поскольку для выхода в заданное положение буксир должен сначала разогнаться относительно объекта, а затем затормозить, тяга должна изменять свое направление в ходе движения. Предлагается следующий закон управления:

$$\eta(t) = \begin{cases} \eta_1, & t \leq \tau, \\ \eta_2, & t > \tau, \end{cases} \quad (9)$$

где η — угол между вектором тяги и местной вертикалью буксира (рисунок 2), τ — момент времени, в который происходит изменение направления вектора тяги буксира. Компоненты ускорения буксира будут равны $a_x = \frac{F}{m_1} \cos \eta(t)$,

$$a_y = \frac{F}{m_1} \sin \eta(t).$$

Таким образом, при заданных массе и тяге буксира величина целевой функции (8) зависит от четырех параметров процесса относительного движения: η_1 , η_2 , τ и T .

3.3. Вращение объекта в ходе захвата и разматывания троса

Плоское вращение свободного тела на круговой орбите относительно орбитальной системы координат описывается уравнением

$$\ddot{\beta} = M_G = 3n^2 \frac{J_y - J_x}{J_z} \cos \beta \sin \beta, \quad (10)$$

где β — угол между продольной осью тела и локальной горизонталью, M_G —

гравитационный момент, J_x — продольный, J_y и J_z — поперечные моменты инерции объекта.

На первом этапе процесса уборки гарпун ударяет в объект, пробивает его оболочку и фиксируется на нем (рисунок 1). Пусть в момент удара объект находится в положении, характеризуемым углом β_0 , а относительные координаты буксира равны x_0 и y_0 (рисунок 3). Угловую скорость объекта после удара $\dot{\beta}^+$ определим как

$$\dot{\beta}^+ = \dot{\beta}^- + \frac{Sa}{J_z}, \quad (11)$$

где $\dot{\beta}^-$ — угловая скорость непосредственно перед ударом, S — ударный импульс от гарпуна, a — плечо ударного импульса относительно центра масс объекта, приближенно определенное из рисунка 3 в предположении, что продольное h и поперечное p смещения точки попадания гарпуна относительно центра масс объекта малы по сравнению с расстоянием $d_0 = d(x_0, y_0)$ между центром масс объекта и буксиром, определяемым по формуле (3),

$$a = h \sin(\beta_0 - \alpha_0) - p \cos(\beta_0 - \alpha_0), \quad (12)$$

$$\alpha_0 = \cos^{-1} \left(\frac{r_0 + x_0}{d_0} \sin \left(\frac{|y_0|}{r_0} \right) \right). \quad (13)$$

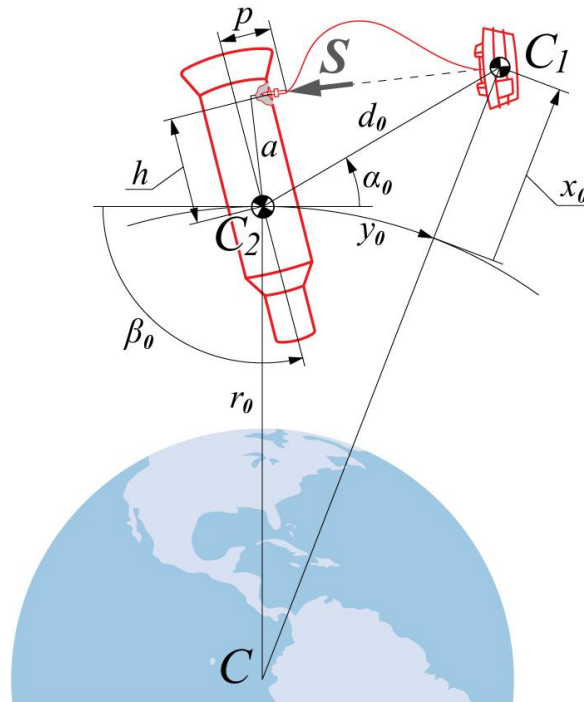


Рисунок 3 — Захват объекта гарпуном

Если угловая скорость объекта после удара изменяется таким образом, что он переходит в колебания относительно устойчивого положения равновесия $\beta = \pi / 2$, можно линеаризовать уравнение (10), разложив его правую часть в ряд Тейлора в окрестности этой точки:

$$\ddot{\beta} = -k^2 \left(\beta - \frac{\pi}{2} \right), \quad (14)$$

где $k = \sqrt{3n^2 \frac{J_y - J_x}{J_z}}$.

Выполним замену переменной в уравнении (14): пусть $\varphi = \beta - \frac{\pi}{2}$. Тогда $\dot{\varphi} = \dot{\beta}$, $\ddot{\varphi} = \ddot{\beta}$, положению устойчивого равновесия будет соответствовать $\varphi = 0$, а уравнение (14) преобразуется в уравнение свободных гармонических колебаний с циклической частотой k :

$$\ddot{\varphi} = -k^2 \varphi. \quad (15)$$

При начальных условиях $\varphi(0) = \varphi_0$ и $\dot{\varphi}(0) = \dot{\varphi}_0$ уравнение (15) имеет частное

решение $\varphi(t) = k\varphi_0 \cos kt + \frac{\dot{\varphi}_0}{k} \sin kt$. Выполнив обратную замену переменной,

получим закон изменения угла ориентации объекта в ходе разматывания троса:

$$\beta(t) = \frac{\pi}{2} + \left(\beta_0 - \frac{\pi}{2} \right) \cos kt + \frac{\dot{\beta}^+}{k} \sin kt. \quad (16)$$

Дифференцируя по времени предыдущее равенство, найдем угловую скорость объекта:

$$\dot{\beta}(t) = \left(\frac{\pi}{2} - \beta_0 \right) k \sin kt + \dot{\beta}^+ \cos kt. \quad (17)$$

Равенства (16) и (17) приближенно описывают вращение захваченного объекта в ходе разматывания троса и в дальнейшем будут использованы для определения требуемого положения точки попадания гарпуна.

3.4. Тросовая буксировка объекта

Если длина троса мала по сравнению с радиусом орбиты объекта, а смещение точки захвата относительно центра масс объекта мало по сравнению с длиной троса, уравнения движения системы на этапе буксировки будут иметь вид

$$\ddot{r} + (\ddot{\alpha} + \ddot{\nu})l \cos \alpha - \dot{\nu}^2 r - (\dot{\alpha} + \dot{\nu})^2 l \sin \alpha = -\frac{N \sin \alpha}{m_1} - \frac{\mu}{r^3} (r - 2l \sin \alpha), \quad (18)$$

$$r\ddot{\nu} + (\ddot{\alpha} + \ddot{\nu})l \sin \alpha + 2\dot{r}\dot{\nu} + (\dot{\alpha} + \dot{\nu})^2 l \cos \alpha = \frac{N \cos \alpha - F}{m_1} + \frac{\mu}{r^3} l \cos \alpha, \quad (19)$$

$$m_2(\ddot{r} - r\dot{\nu}^2) = -\frac{m_2\mu}{r^2} + N \sin \alpha, \quad (20)$$

$$m_2(r\ddot{\nu} + 2\dot{r}\dot{\nu}) = -N \cos \alpha, \quad (21)$$

$$J_z(\ddot{\beta} + \ddot{\nu}) = -N(h \sin(\beta - \alpha) - p \cos(\beta - \alpha)) + 3 \frac{\mu}{r^3} \frac{J_y - J_x}{J_z} \cos \beta \sin \beta, \quad (22)$$

где r — расстояние от центра масс объекта до центра Земли, ν — истинная аномалия центра масс объекта (рисунок 4), α — угол между тросом и локальной горизонталью объекта, N — сила натяжения троса. Уравнения (18) и (19) описывают движение буксира, уравнения (20) и (21) — движение центра масс объекта, уравнение (22) — вращение объекта вокруг центра масс. Представленная форма уравнений позволяет лучше понять физическую сущность задачи, поскольку содержит, наряду с ускорениями, вызванными силами тяги буксира F , натяжения троса N и тяжести G_1 и G_2 (рисунок 4), также и ускорения от сил инерции.

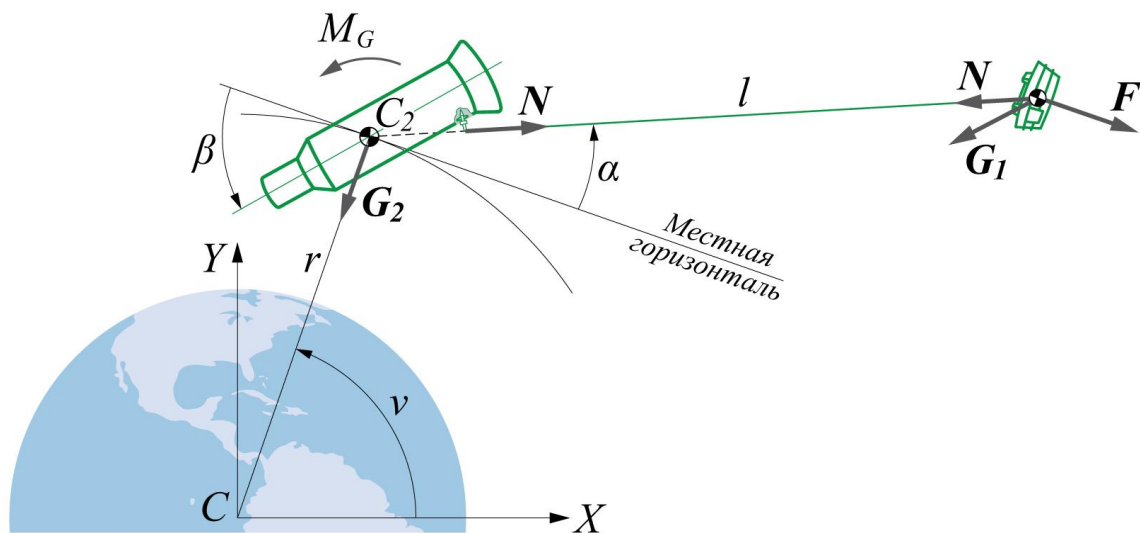


Рисунок 4 — Схема тросовой буксировки объекта

Для приближенного определения положения равновесия объекта β_s положим

в уравнении (22) равными нулю вторую производную от истинной аномалии $\ddot{\nu}$ и гравитационный момент $M_G = 3\frac{\mu}{r^3}\frac{J_y - J_x}{J_z}\cos\beta\sin\beta$, так как $\ddot{\nu}$ для близкой к круговой орбите мало, а момент от силы натяжения троса значительно превышает гравитационный. Тогда уравнение (22) примет вид

$$\ddot{\beta} = -\frac{N(h\sin(\beta - \alpha) - p\cos(\beta - \alpha))}{J_z}. \quad (23)$$

При равновесии $\ddot{\beta} = 0$, и из уравнения (23) имеем

$$\beta_s = \alpha_s + \tan^{-1}\left(\frac{p}{h}\right). \quad (24)$$

Из (24) следует, что значение β_s соответствует положению объекта, при котором его центр масс находится на одной прямой с натянутым тросом.

4. Численное моделирование

4.1. Алгоритм численного моделирования

Несмотря на то, что процесс уборки разделен на три этапа со вполне четкими границами (см. п. 2), происходящие в ходе этих этапов движения находятся в сложной взаимосвязи, которая не позволяет выполнить простое моделирование от первого этапа к последнему ввиду недостатка исходных данных. Например, поскольку в процессе разматывания троса объект вращается, это накладывает строгие требования на ориентацию объекта в момент захвата и место попадания гарпуна: угловая скорость объекта после удара должна стать такой, чтобы за время разматывания троса объект вышел в буксировочное положение и имел в этот

момент нулевую угловую скорость. Для решения описанной проблемы был разработан следующий алгоритм численного моделирования.

1. Находим требуемое относительное положение буксира по окончании разматывания троса по формулам (5) и (6).

2. Используя полученные значения, моделируем относительное движение буксира на втором этапе с помощью уравнений (1) и (2). Минимизируя целевую функцию (8), находим параметры закона управления (9) η_1 , η_2 , τ и время разматывания троса T .

3. По известному времени разматывания можно определить требуемые ориентацию объекта в момент захвата β_0 и продольное смещение h точки попадания гарпуна относительно центра масс объекта, а также положение устойчивого равновесия объекта при буксировке β_s и его угловую скорость после удара $\dot{\beta}^+$. Для этого необходимо, используя уравнения (11), (16), (17) и (24) составить и решить следующую систему нелинейных уравнений относительно указанных неизвестных:

$$\frac{\pi}{2} + \left(\beta_0 - \frac{\pi}{2} \right) \cos kT + \frac{\dot{\beta}^+}{k} \sin kT = \beta_s,$$

$$\beta_s = \alpha_s + \tan^{-1} \left(\frac{p}{h} \right),$$

$$\left(\frac{\pi}{2} - \beta_0 \right) k \sin kT + \dot{\beta}^+ \cos kT = 0,$$

$$\dot{\beta}^+ = \dot{\beta}^- + \frac{Sa(h)}{J_z},$$

где плечо ударного импульса $a(h)$ определяется по формуле (12).

4. Зная ориентацию объекта в момент захвата β_0 и угловую скорость объекта сразу после захвата $\dot{\beta}^+$, моделируем его вращение в ходе разматывания троса при помощи уравнения (10).

5. Используя полученные в п. 4 начальные условия, моделируем тросовую буксировку объекта на основе уравнений (18)–(22).

4.2. Моделирование уборки верхней ступени ракеты Ariane 4

В качестве примера рассмотрим уборку верхней ступени ракеты Ariane 4 Н10 [17] буксиром, который может иметь различную массу. Параметры объекта и буксира приведены в таблице 1.

Выполним численное моделирование согласно алгоритму, приведенному в п. 4.1.

Таблица 1

Параметры объекта и буксира

Объект	
Масса $m_2, кг$	2154
Моменты инерции, $кг \cdot м^2$:	
продольный J_x	3000
поперечные $J_y = J_z$	28000
Диаметр $D, м$	2,6
Радиус орбиты $r, км$	7071
Буксир	
Масса $m_1, кг$	175; 200; 225
Тяга $F, Н$	0,5
Длина троса, $l, м$	1000

В соответствии с пунктами 1 и 2 алгоритма определим угол наклона троса, соответствующий положению равновесия, и требуемые относительные координаты буксира, после чего найдем параметры оптимальных законов управления (таблица 2) в процессе разматывания троса. Для поиска значений параметров был использован генетический алгоритм [22]; отклонение буксира от требуемого положения составило не более $2,3 \cdot 10^{-5}$ м, а относительная скорость не более $1,5 \cdot 10^{-8}$ м/с. Приведенные в таблице 2 результаты получены для следующих начальных условий:

$$x(0) = 30 \text{ м}, y(0) = -50 \text{ м}, \dot{x}(0) = 0, \dot{y}(0) = -0,02 \text{ м/с},$$

т. е. изначально буксир находится на круговой орбите, которая на 30 м выше орбиты центра масс объекта, отстает на 50 м, а его относительная скорость равна разности орбитальных скоростей. Из таблицы 2 видно, что чем больше масса буксира, тем выше относительно объекта находится положение устойчивого равновесия и тем большее время требуется для выхода в заданную точку.

Таблица 2

Результаты оптимизации относительного движения буксира

m_1 , кг	α_s , рад	x_s , м	y_s , м	η_1 , рад	η_2 , рад	τ	T
175	0,565	535,2	-844,7	-0,413	2,127	8 мин 41 с	20 мин 13 с
200	0,739	673,6	-739,1	-0,064	2,498	8 мин 13 с	24 мин 25 с
225	0,854	753,9	-657,0	0,513	2,861	7 мин 35 с	32 мин 18 с

На рисунке 5 приведены рассчитанные относительные траектории буксира,

векторы тяги $F(t)$, точки изменения ее направления B_i , а также начальное C_{10} и конечные положения буксира D_i . На рисунке 6 показаны зависимости относительных скоростей буксира от расстояния до центра масс объекта. Видно, что при первоначальном направлении тяги происходит разгон буксира относительно объекта, а после изменения направления тяги в точках B_i начинается торможение, по завершении которого буксир оказывается в конечной точке D .

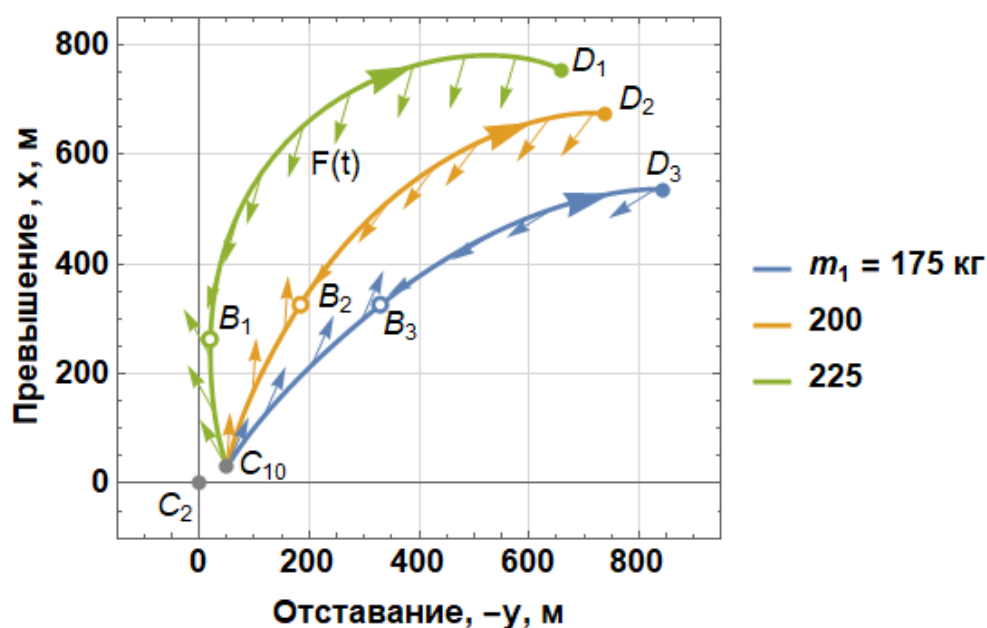


Рисунок 5 — Траектории буксира относительно центра масс объекта при разматывании троса

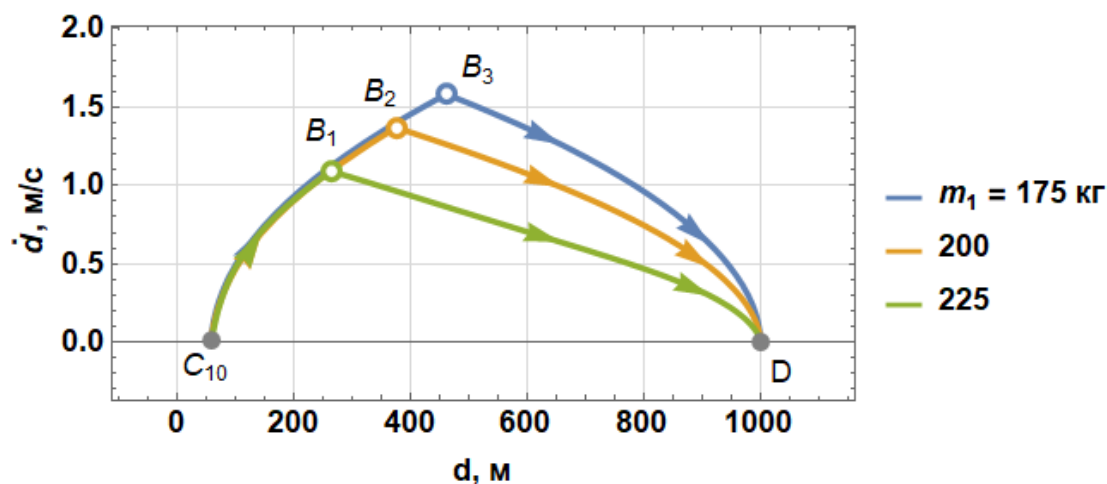


Рисунок 6 — Фазовый портрет движения буксира относительно центра масс объекта при разматывании троса

По известному времени разматывания троса T в соответствии с пунктами 3 и 4 алгоритма численного моделирования найдем расстояние h , характеризующее положение точки попадания гарпуна (рисунок 3), а также необходимые значения углов поворота и угловых скоростей объекта: в момент захвата и по окончании разматывания троса (таблица 3). Приведенные в таблице результаты получены при следующих параметрах процесса захвата:

- угловая скорость объекта в момент захвата $\dot{\beta}^- = -0,002 \text{ рад/с}$,
- поперечное смещение точки попадания гарпуна $p = D/2 = 1,3 \text{ м}$,
- ударный импульс гарпуна $S = 50 \text{ кг} \cdot \text{м/с}$.

Из таблицы 3 видно, что чем больше масса буксира, тем ближе положение устойчивого равновесия объекта при буксировке β_s к величине $\frac{\pi}{2}$, которая соответствует положению устойчивого равновесия при отсутствии натяжения троса, когда на объект действует только гравитационный момент; и тем больше, соответственно, должно быть положительное приращение угловой скорости объекта при захвате, которое достигается за счет большего продольного смещения точки попадания гарпуна относительно центра масс объекта. Таблица 3 также показывает, что, несмотря на то, что для определения ориентации объекта в момент захвата использовалось линеаризованное уравнение движения (14), значения углов

ориентации объекта по окончании разматывания троса $\beta(T)$ мало отличаются от соответствующих равновесных значений β_s , а угловые скорости $\dot{\beta}(T)$ близки к нулю.

Таблица 3

Результаты моделирования движения объекта при захвате и после него

m_1 , кг	h , м	β_0 , рад	$\dot{\beta}^+$, рад/с	β_s , рад	$\beta(T)$, рад	$\dot{\beta}(T)$, рад/с
175	1,49	1,72	$-4,3 \cdot 10^{-4}$	1,282	1,278	$-1,7 \cdot 10^{-5}$
200	1,67	1,71	$-1,6 \cdot 10^{-4}$	1,402	1,401	$-3,9 \cdot 10^{-6}$
225	1,93	1,67	$1,3 \cdot 10^{-4}$	1,446	1,446	$-3,8 \cdot 10^{-6}$

В завершение выполним численное моделирование тросовой буксировки продолжительностью 10 часов, используя в качестве начальных условий для объекта значения $\beta(T)$ и $\dot{\beta}(T)$ из таблицы 3. Поскольку, как было указано выше, найденные параметры оптимального закона управления обеспечивают весьма точное попадание буксира в заданную точку с относительной скоростью, близкой к нулю, начальные значения угла наклона троса α примем равными α_s , а начальные значения угловых скоростей $\dot{\alpha}$ нулевыми.

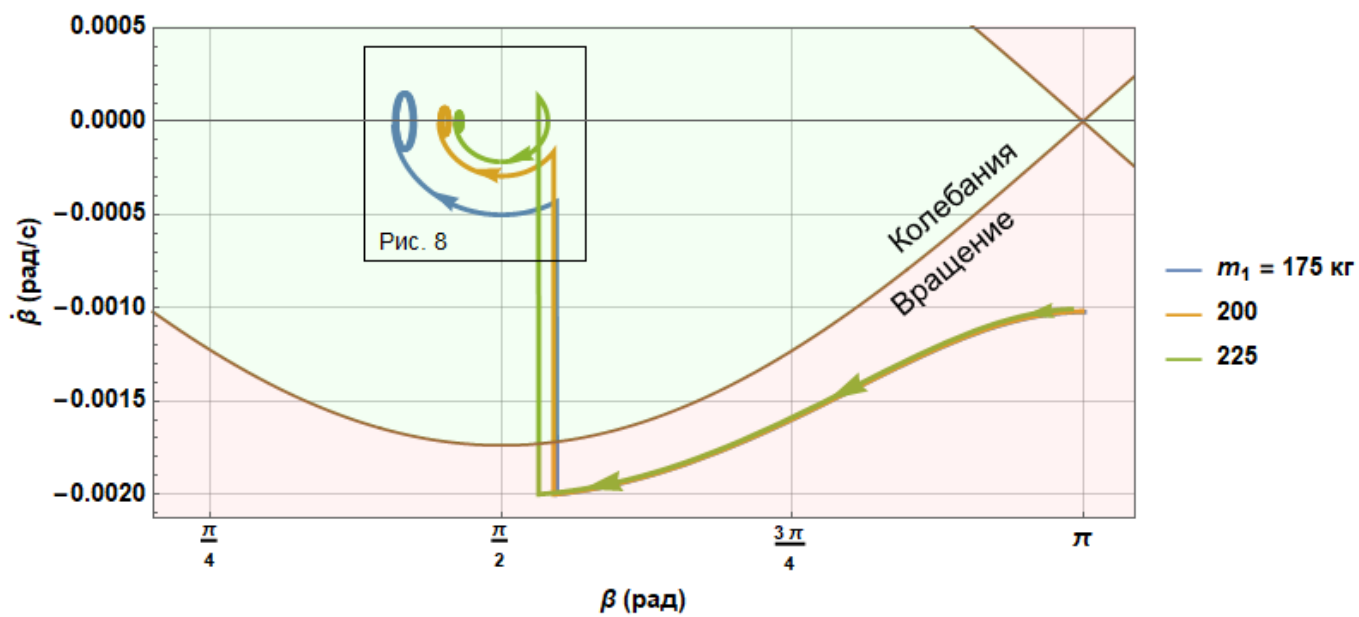


Рисунок 7 — Фазовые портреты движения объекта
в ходе всего процесса уборки

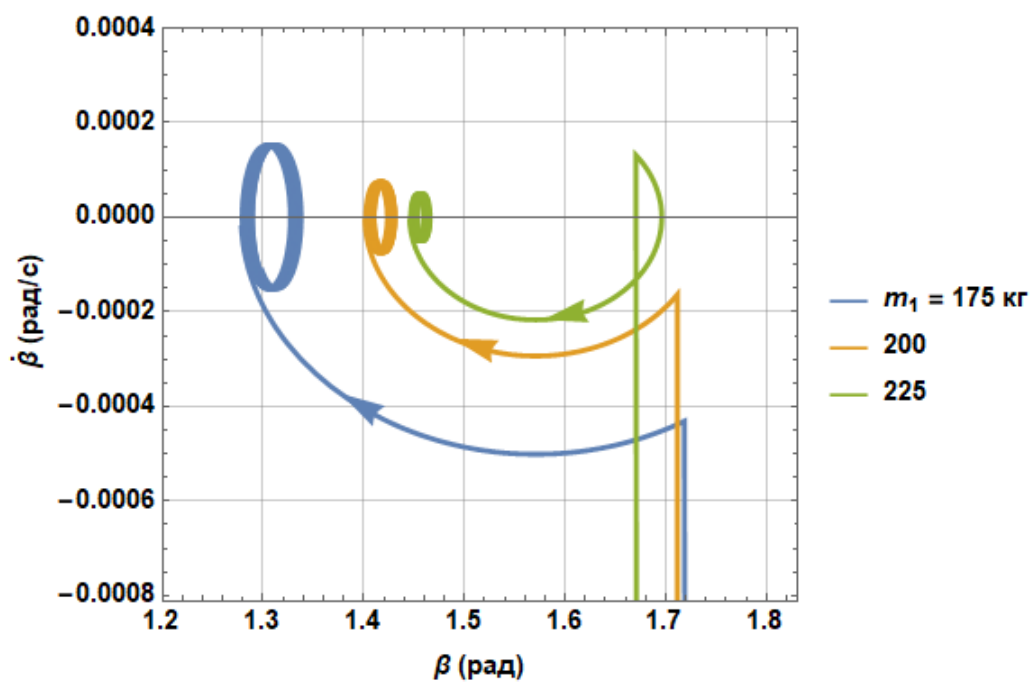


Рисунок 8 — Фазовые портреты движения объекта
в процессе разматывания троса и буксировки

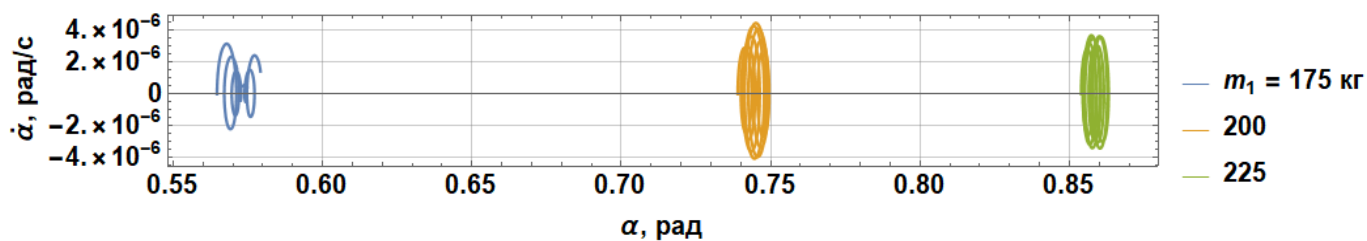


Рисунок 9 — Фазовые портреты колебаний троса
в процессе буксировки

На рисунках 7 и 8 показаны фазовые портреты движения объекта в ходе всего процесса уборки. Видно, что изначально вращающийся объект после захвата, мгновенно изменяющего его угловую скорость, начинает колебаться вокруг точки $\beta = \frac{\pi}{2}$ и за время разматывания троса приближается к положению устойчивого равновесия при буксировке, в ходе которой колеблется уже относительно этого положения. На рисунке 9 приведены фазовые портреты колебаний троса в ходе буксировки, из которых следует, что и трос в ходе буксировки колеблется относительно найденных положений равновесия. Полученные движения троса и объекта обеспечивают безопасную буксировку, поскольку исключают наматывание троса на объект и обеспечивают стабильное положение троса относительно локальной горизонтали, облегчающее управление ориентацией буксира.

5. Заключение

В статье был рассмотрен способ захвата космического мусора, предполагающий три этапа: захват объекта гарпуном, разматывание троса

и буксировку. Буксировка будет безопасной, если и натянутый трос, и объект будут колебаться относительно положений устойчивого равновесия. В связи с этим предложен способ захвата вращающегося объекта, позволяющий изменить его начальную угловую скорость за счет удара гарпуна так, что за время разматывания троса он перейдет в требуемое для безопасной буксировки положение. Приведены зависимости, позволяющие определить требуемое положение точки попадания гарпуна и ориентацию объекта в момент захвата. Движение буксира при разматывании троса моделировалось при помощи уравнений относительного движения. При этом предложен закон управления тягой буксира, обеспечивающий по окончании разматывания требуемую для безопасной буксировки ориентацию троса и исключающий его обрыв. Анализ уравнений движения системы на этапе буксировки позволил получить простой метод приближенного определения требуемого угла ориентации объекта.

Результаты численного моделирования процесса уборки верхней ступени ракеты Ariane 4 показали, что при заданной величине тяги буксира его выход в заданное положение при разматывании троса возможен в значительном диапазоне масс буксира. В то же время, очевидно ограничение предлагаемого способа, в котором кинетическая энергия вращательного движения объекта уменьшается лишь за счет удара гарпуна: он не подходит для захвата быстро вращающихся объектов.

Развитием данной работы может быть исследование способа уборки быстро вращающихся пассивных объектов, отличающегося тем, что на этапе разматывания

троса для более эффективного торможения вращения объекта используется натяжение троса.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-01-00215-а.

Библиографический список

1. Nakima H., Emami M.R. Assessment of active methods for removal of LEO debris // Acta Astronautica, 2018, vol. 144, pp. 225 - 243.
2. Пикалов Р.С., Юдинцев В.В. Обзор и выбор средств увода крупногабаритного космического мусора // Труды МАИ. 2018. № 100. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=93299>
3. Bombardelli C., Pelaez J. Ion beam shepherd for contactless space debris removal // Journal of guidance, control, and dynamics, 2011, vol. 34, no. 3, pp. 916 - 920.
4. Ашурбейли И.Р., Лаговьер 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. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=24856>
5. Авдеев А.В., Метельников А.А. Бортовая лазерная силовая установка для борьбы с космическим мусором // Труды МАИ. 2016. № 89. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=72840>
6. Рязанов В.В. Управление движением космического аппарата при бесконтактном уводе космического мусора // Труды МАИ. 2019. № 107. URL:

<http://trudymai.ru/published.php?ID=107837>

7. Nishida S.I., Kawamoto S., Okawa Y., Terui F., Kitamura S. Space debris removal system using a small satellite // *Acta Astronautica*, 2009, vol. 65, no. 1 – 2, pp. 95 - 102.
8. Schaub H., Sternovsky Z. Active space debris charging for contactless electrostatic disposal maneuvers // *Advances in Space Research*, 2014, vol. 53, no. 1, pp. 110 - 118.
9. Kumar K. et al. Agora: Mission to demonstrate technologies to actively remove Ariane rocket bodies // In *Proceedings of the International Astronautical Congress (IAC 2015)*, Jerusalem, International Astronautical Federation, 2015, pp. 1 – 16.
10. Асланов В.С., Алексеев А.В., Ледков А.С. Определение параметров оснащенной гарпуном тросовой системы для буксировки космического мусора // *Труды МАИ*. 2016. № 90. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=74644>
11. Aslanov V.S. Chaos Behavior of Space Debris during Tethered Tow // *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 2015, vol. 39, no. 10, pp. 2399 - 2405.
12. Aslanov V.S., Yuditsev V.V. Chaos in Tethered Tug–Debris System Induced by Attitude Oscillations of Debris // *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 2019, vol. 42, no. 7, available at: <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/1.G004162>
13. Jasper L., Schaub H. Input shaped large thrust maneuver with a tethered debris object // *Acta Astronautica*, 2014, vol. 96, no. 1, pp. 128 - 137.
14. Botta E.M., Sharf I., Misra A.K. Contact Dynamics Modeling and Simulation of Tether Nets for Space-Debris Capture // *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 2016, vol. 40, no. 1, pp. 110 - 123.

15. Forshaw J.L. et al. Final payload test results for the RemoveDebris active debris removal mission // *Acta Astronautica*, 2017, vol. 138, pp. 326 - 342.
16. Kang J., Zhu Z.H. Dynamics and control of de-spinning giant asteroids by small tethered spacecraft // *Aerospace Science and Technology*, 2019, vol. 94, available at: <https://doi.org/10.1016/j.ast.2019.105394>
17. Ortiz Gómez N., Walker S.J.I. Eddy currents applied to de-tumbling of space debris: Analysis and validation of approximate proposed methods // *Acta Astronautica*, 2015, vol. 114, pp. 34 - 53.
18. Асланов В.С., Сизов Д.А. Динамика захвата космического мусора гарпуном // Труды МАИ. 2018. № 100. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=93301>
19. Dudziak R., Tuttle S., Barraclough S. Harpoon technology development for the active removal of space debris // *Advances in Space Research*, 2015, vol. 56, no 3, pp. 509 - 527.
20. Aglietti G.S. et al. The active space debris removal mission RemoveDebris. Part 2: in orbit operations // *Acta Astronautica*, 2019, available at: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2019.09.001>
21. Kluever C.A. *Space Flight Dynamics*, John Wiley & Sons, 2018, 584 p.
22. Deb K. An efficient constraint handling method for genetic algorithms // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2000, vol. 186, no. 2 – 4, pp. 311 - 338.