

Влияние выбора точки закрепления троса на процесс буксировки космического мусора

Л.Ф. Файзуллин¹, Р.С. Пикалов¹

¹Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

Аннотация. В работе исследуется влияние выбора точки закрепления троса на динамику системы буксир - космический мусор на тросовой связи. Построена математическая модель системы: буксир моделируется как материальная точка, объект космического мусора как твердое тело, трос рассматривается как упругий невесомый стержень; рассмотрена плоская задача в бессиловом и гравитационном полях, проведен численный эксперимент.

1. Введение

Исследование и освоение космического пространства - одно из самых перспективных направлений научной деятельности. В 21 веке развитие этой отрасли идет стремительными темпами. Вместе с тем, активное освоение космического пространства создает разного рода проблемы, одной из которых является засорение околоземного пространства космическим мусором. Под космическим мусором подразумеваются непригодные для дальнейшей эксплуатации, неуправляемые искусственные объекты, находящиеся на орбите Земли. Размеры таких объектов могут колебаться от нескольких миллиметров до нескольких метров в диаметре. Наиболее опасным считается так называемый крупногабаритный космический мусор, любое столкновение с которым может привести к разрушению активного аппарата.

В научно-технической литературе предложено множество способов увода космического мусора [1,2]. В данной работе рассмотрен метод увода мусора с помощью буксировки на гибком тросе. Необходимо отметить, что при захвате такого космического объекта с помощью тросовых систем могут возникать проблемы различного характера: колебания мусора, порождаемые гибкостью используемой связи, угловые скорости вращения захватываемого объекта, разрыв связи.

В данной работе изучается влияние расположения точки закрепления троса на космическом мусоре на процесс буксировки. В работе построены математические модели рассматриваемой системы: в бессиловом поле и в центральном ньютоновском гравитационном поле. Проведена серия численных экспериментов.

2. Уравнения движения системы буксир-космический мусор

Для исследования динамики рассматриваемой системы построим математическую модель состоящей из буксира и буксируемого объекта космического мусора. Буксир считается материальной точкой, мусор - твердым телом, трос моделируется как упругий невесомый стержень. Рассматривается плоское движение системы. Ориентация космического мусора

относительно его центра масс определяется углом φ . Так же на буксир действует сила тяги двигателя \vec{F} .

Рассмотрим два случая движения связки: первый – в бессиловом поле, второй – в центральном ньютоновском гравитационном поле.

2.1. Бессиловое поле

Зададим радиус-вектор положения буксира – $\vec{r}_1 = \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \end{pmatrix}$, радиус-вектор центра масс объекта

мусора – $\vec{r} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$, тогда в случае закрепления троса в углу мусора, радиус-вектор точки закрепления запишется:

$$\vec{r}_\rho = \begin{pmatrix} \frac{1}{2}d \cos(\varphi) - \frac{1}{2}d \sin(\varphi) + x \\ \frac{1}{2}d \sin(\varphi) + \frac{1}{2}d \cos(\varphi) + y \end{pmatrix}.$$

Вектор \vec{l} , определяющий длину троса, определим как разность радиус-вектора буксира и радиус вектора точки закрепления:

$$\vec{l} = \vec{r}_1 - \vec{r}_\rho.$$

Схема системы представлена на рисунке 1:

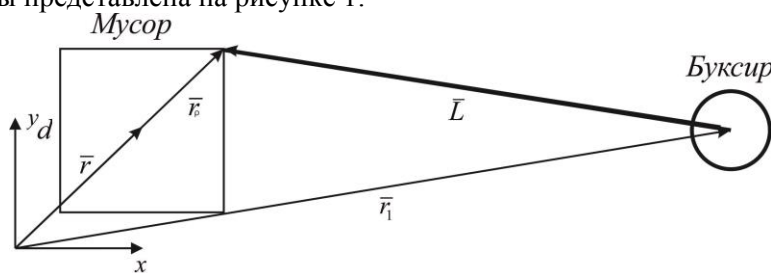


Рисунок 1. Схема системы.

Система уравнений, описывающих движение системы, в общем виде выглядит так:

$$\begin{aligned} m_1 \vec{w}_1 &= \vec{F} - \vec{T}, \\ m \vec{w} &= \vec{T}, \\ I \vec{\varepsilon} &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Запишем вектор, определяющий силу упругости \vec{T} :

$$\vec{T} = \frac{c(|\vec{l}| - l_0)}{|\vec{l}|} \vec{l}.$$

Учитывая форму объекта космического мусора, то есть $I = m \frac{d^2}{6}$, система уравнений (1) можно переписать в виде:

$$\begin{aligned} m_1 \vec{w}_1 &= \vec{F} - \frac{c(|\vec{l}| - l_0)}{|\vec{l}|} \vec{l}, \\ m \vec{w} &= \frac{c(|\vec{l}| - l_0)}{|\vec{l}|} \vec{l}, \\ m \frac{d^2}{6} \vec{\varepsilon} &= 0, \end{aligned}$$

где $\vec{F} = F \cdot (1, 0)$ - сила тяги двигателей буксира.

Полученная система уравнений описывает движение связки буксир-космический мусор в бессиловом поле.

2.2. Гравитационное поле

Рассмотрим теперь движение системы в центральном ньютоновском гравитационном поле. Для описания движения буксира и центра масс мусора используем известные уравнения Хилла [3] для двух точек:

$$\begin{aligned} \ddot{x}_1 &= 2w\dot{y}_1 + \frac{1}{m_1} \Phi_x, \\ \ddot{y}_1 &= 3w^2 y_1 - 2w\dot{x}_1 + \frac{1}{m_1} \Phi_y, \\ \ddot{x} &= 2w\dot{y} + \frac{1}{m} \Phi_{1x}, \\ \ddot{y} &= 3w^2 y - 2w\dot{x} + \frac{1}{m} \Phi_{1y}, \\ \ddot{\phi} &= \frac{-3\Phi_{1y}(\cos \phi - \sin \phi) - 3\Phi_{1x}(\sin \phi + \cos \phi)}{md}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\vec{\Phi} = \vec{F} - \vec{T}$, $\vec{\Phi}_1 = \vec{T}$.

3. Численный эксперимент

Проведем серию численных экспериментов. Будем рассматривать систему со следующим параметрами:

$$m = 2000 \text{ кг}, m_1 = 800 \text{ кг}, d = 5 \text{ м}, l_0 = 25 \text{ м}, c = 2000 \text{ кг/м}, P = 100 \text{ Н}, w = 0.00116 \text{ рад/с}.$$

Выбранная угловая скорость соответствует периоду обращения 5400 с, то есть – 1.5 часа.

3.1. Движение в бессиловом поле

Численное интегрирование будем проводить в двух разных точках закрепления в связанной с телом системе координат: в точке $(d/2, 0)$ и в точке $(d/2, d/2)$. Первая точка лежит на одной из главных осей инерции тела. Вторая точка расположена в углу объекта космического мусора.

Численное интегрирование в первой точке

Результаты интегрирования системы приведены на рисунках 2-4:

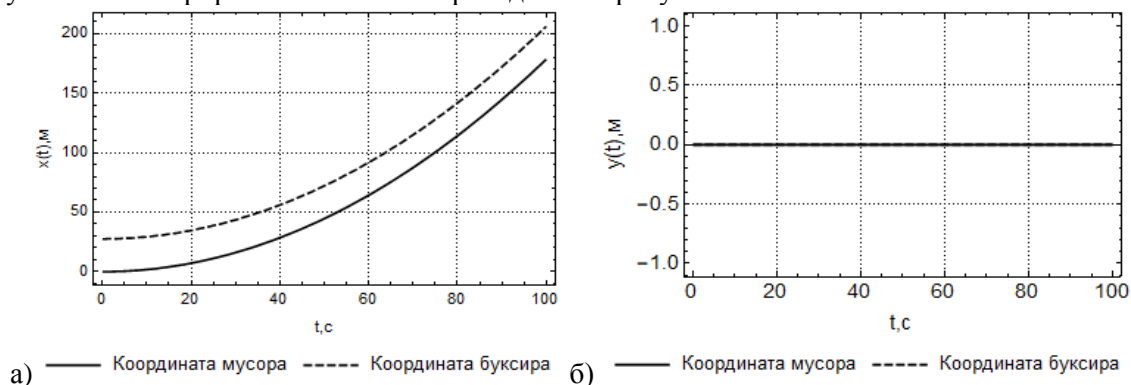


Рисунок 2. (а) - Зависимость положения буксира и мусора по оси x от времени. (б) - Зависимость положения буксира и мусора по оси y от времени.

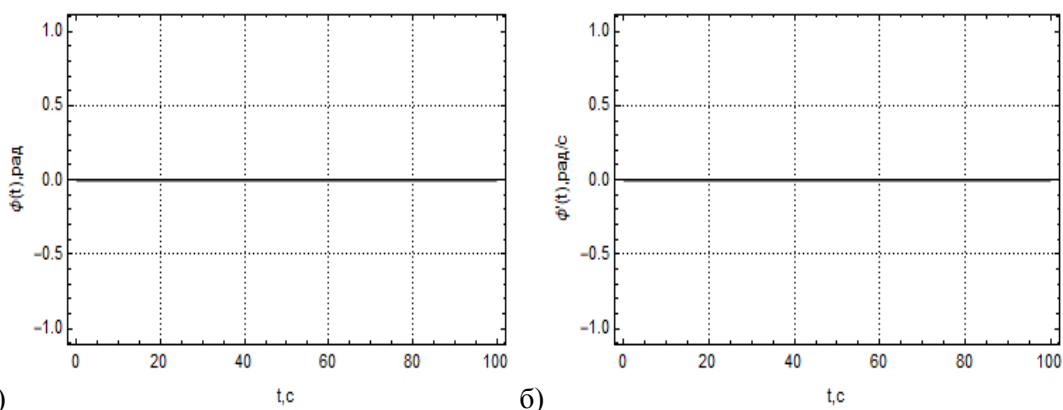


Рисунок 3. (а) - Зависимость углового положения мусора от времени. (б) - Зависимость угловой скорости мусора от времени.

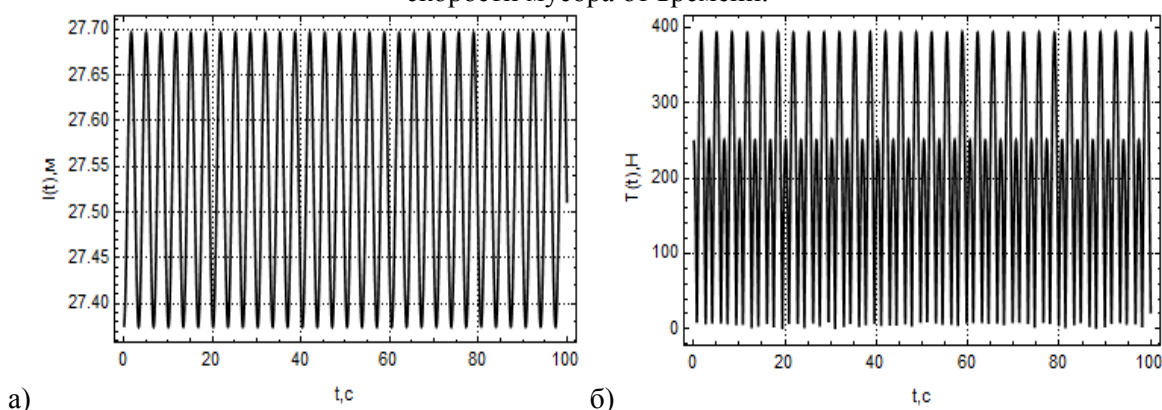


Рисунок 4. (а) - Зависимость длины троса от времени. (б) - Зависимость силы упругости от времени.

По рисункам видно, что движение по оси y и движение мусора вокруг своего центра масс отсутствует. В то же время, трос колеблется вокруг своего начального положения с небольшой амплитудой и высокой частотой.

Численное интегрирование во второй точке
 Результаты интегрирования системы приведены на рисунках 5-7:

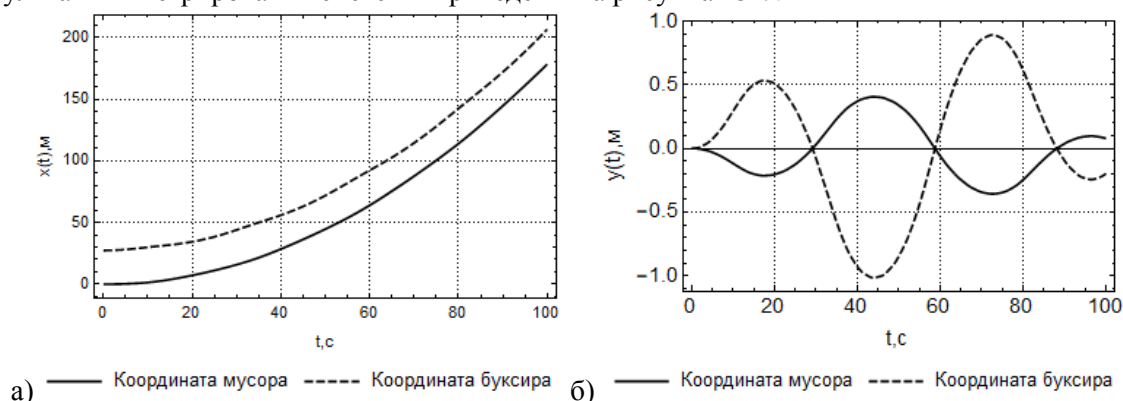


Рисунок 5. (а) - Зависимость положения буксира и мусора по оси x от времени. (б) - Зависимость положения буксира и мусора по оси y от времени.

Видно, что смещение точки закрепления породило движение по оси y а так же вызвало вращение космического мусора. Вместе с тем, амплитуда колебаний троса заметно увеличилась, одновременно, упала их частота.

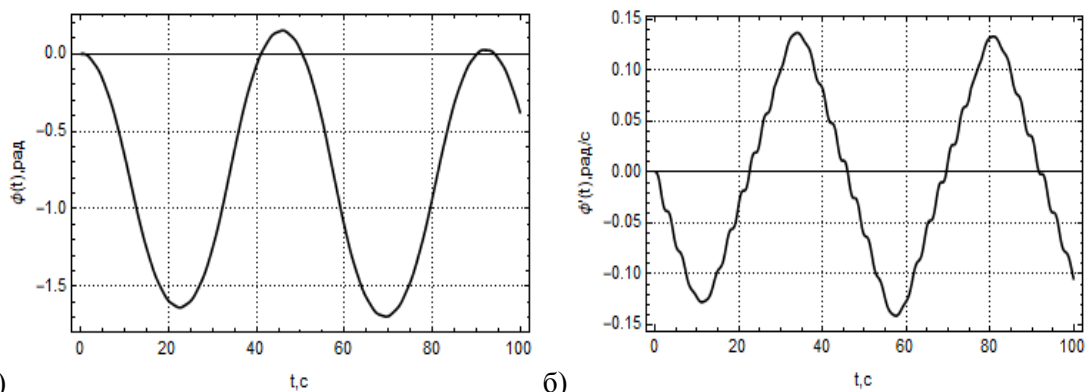


Рисунок 6. (а) - Зависимость углового положения мусора от времени. (б) - Зависимость угловой скорости мусора от времени.

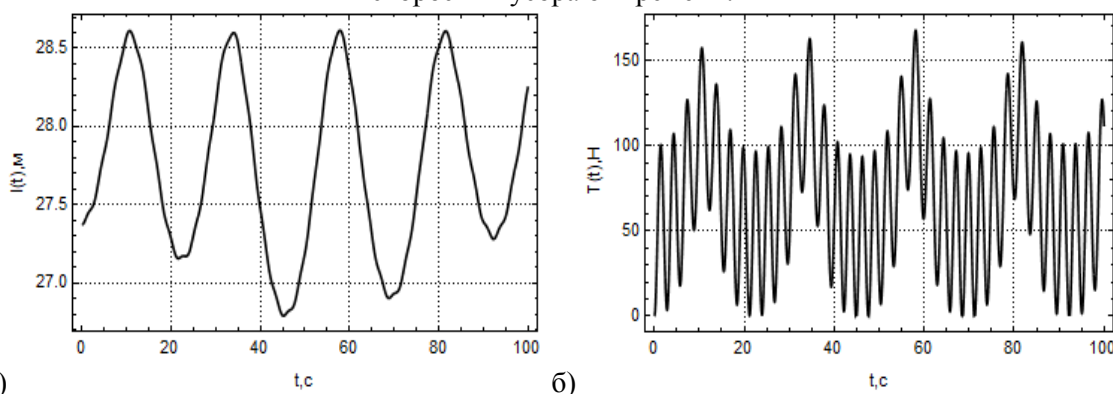


Рисунок 7. (а) - Зависимость длины троса от времени. (б) - Зависимость силы упругости от времени. Амплитуда колебаний троса заметно увеличилась, одновременно, упала частота.

3.2. Эксперимент в гравитационном поле

Проведем интегрирование в тех же точках, что и в разделе 3.1

Численное интегрирование в первой точке

Результаты интегрирования системы приведены на рисунках 8-10:

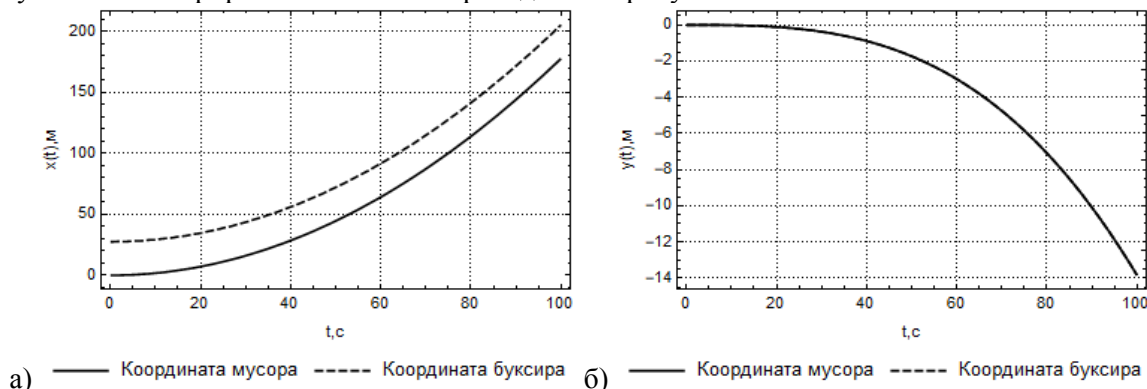
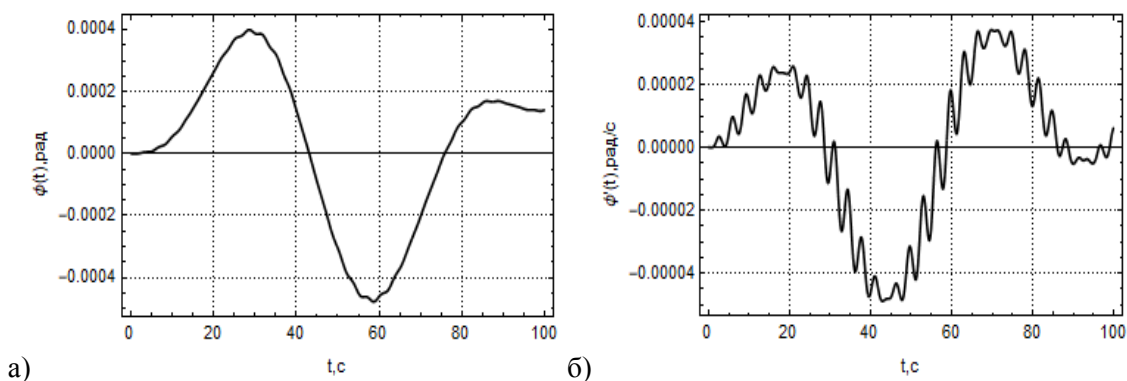
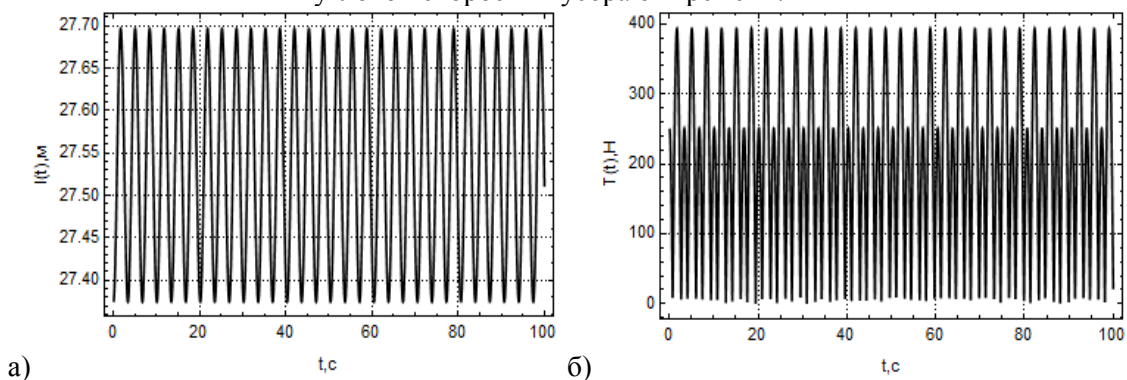


Рисунок 8. (а) - Зависимость положения буксира и мусора по оси x от времени. (б) - Зависимость положения буксира и мусора по оси y от времени.

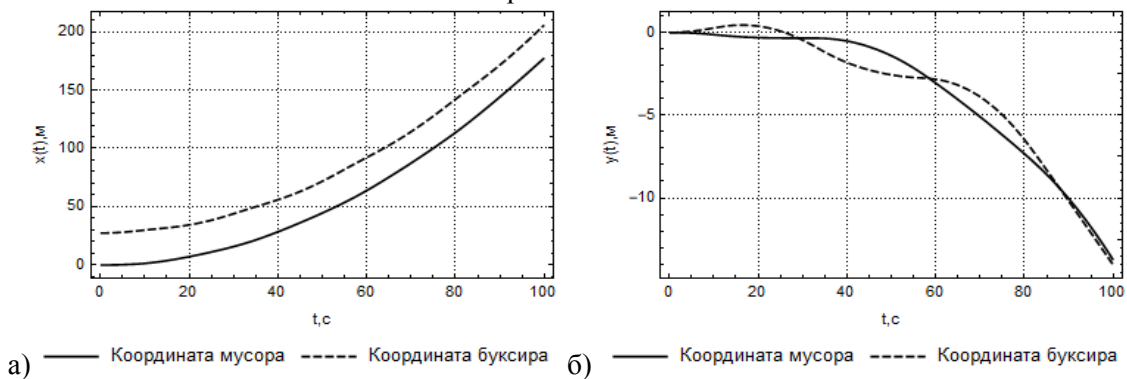
Гравитационное поле так же порождает движение по оси y , причем графики движения двух объектов совпадают. Одновременно с этим, наблюдаются достаточно медленные колебания космического мусора вокруг своего центра масс вблизи начального положения объекта. На рисунках снова появляются низкоамплитудные высокочастотные колебания троса вокруг начального положения.



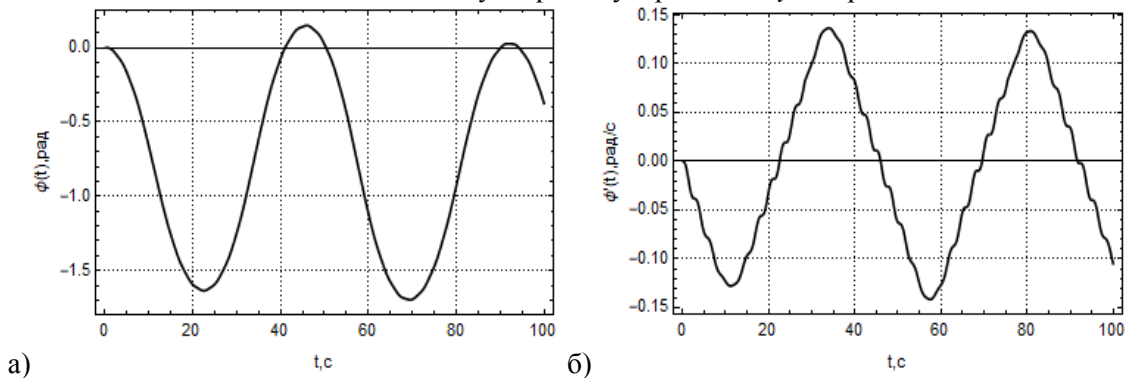
а) **Рисунок 9.** (а) - Зависимость углового положения мусора от времени. (б) - Зависимость угловой скорости мусора от времени.



а) **Рисунок 10.** (а) - Зависимость длины троса от времени. (б) - Зависимость силы упругости от времени.



а) **Рисунок 11.** (а) - Зависимость положения буксира и мусора по оси x от времени. (б) - Зависимость положения буксира и мусора по оси y от времени.



а) **Рисунок 12.** (а) - Зависимость углового положения мусора от времени. (б) - Зависимость угловой скорости мусора от времени.

Численное интегрирование во второй точке. Результаты интегрирования системы приведены на рисунках 11-13.

Заметно, что графики по оси y со временем начинают совпадать. Вместе с тем, колебания угла в данном случае имеют большую амплитуду и угловую скорость. Колебания троса очень схожи с теми, что наблюдались в разделе 3.1.2.

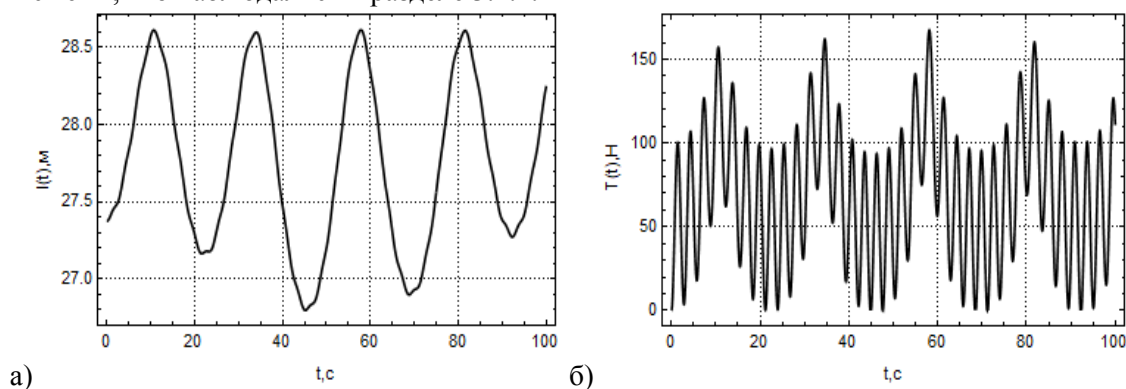


Рисунок 13. (а) - Зависимость длины троса от времени. (б) - Зависимость силы упругости от времени.

4. Заключение

В ходе работы было проведено исследование влияния выбора точки закрепления объекта космического мусора на динамику системы. Проведена серия численных экспериментов при разных точках закрепления. На основе полученных результатов можно сделать вывод о том, что обе точки закрепления имеют свои достоинства и недостатки, однако, первая точка обладает важным преимуществом – отсутствие вращения буксируемого тела.

5. Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных исследований (проект РФФИ № 18-01-00215-А).

6. Литература

- [1] Асланов, В.С. Выбор параметров системы увода космического мусора с упругими элементами посредством тросовой буксировки / В.С. Асланов, В.В. Юдинцев // Труды МАИ. – 2018. – №. 1. – С. 7-17.
- [2] Пикалов, Р.С. Обзор и выбор средств увода крупногабаритного космического мусора / Р.С. Пикалов, В.В. Юдинцев // Труды МАИ. – 2018. – № 100.
- [3] Schaub, H. Analytical Mechanics of Space Systems, AIAA Education Series / H. Schaub, J.L. Junkins // American Institute of Aeronautics and Astronautics – Reston, VA, 2003. – 231 p.

The influence of the choice of the engagement point of the tether on the process of towing the space debris

L.F. Faizullin¹, R.S. Pikalov¹

¹Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

Abstract. This study focuses on the dynamics of the tethered towing of the space debris. The motion of the system is considered in the central gravitational field. A mathematical model is constructed. The space tug is modeled as a material point, the space debris as a solid body. The elastic tether connects objects to each other. In this study, we assumed that the point of attachment of the tether to the space debris can be chosen arbitrarily. The aim of the work is to study the influence of the choice of the tether engagement point on the dynamics of the space tug - space debris system at the towing stage.