

# Моделирование функционирования систем преодоления астероидной опасности на примере астероида Апофис

О.Л. Старинова<sup>а</sup>, Е.А. Николаева<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, 443086, Московское шоссе, 34, Самара, Россия

## Аннотация

В представленной работе выявлены параметры астероидов, сближающихся с Землёй. Рассмотрены два метода изменения траектории потенциально-опасного астероида: с помощью гравитационного тягача и с использованием двигательной установки, установленной непосредственно на астероиде. Разработаны математические модели движения, программы управления и программный комплекс, предназначенный для визуализации траекторий астероида и гравитационного тягача.

**Ключевые слова:** астероидная опасность; моделирование движения; траектория движения; математическая модель; космический аппарат.

## 1. Введение

Проблема астероидной опасности для Земли уже достаточно давно привлекает внимание ученых и общества. Исследование следов катастроф космического происхождения на поверхности Земли и небесных тел и наблюдение астероидов в ближайшем околоземном пространстве, показывают серьезность астероидной опасности для земной цивилизации и необходимость разработки мер для ее предотвращения [2].

Исследования, посвященные вопросам астероидной опасности, охватывают несколько направлений. Прежде всего – обнаружение опасных астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ), и определение их орбит. В настоящее время имеется несколько национальных программ оптического наблюдения этих тел (NASA, LINEAR, ESA). Полагают, что с помощью этих программ выявлено большая часть таких тел, размерами порядка километра и более. Цельный ряд исследований и проектов рассматривают меры противодействия небесным пришельцам – изменения их орбит или разрушения на мелкие осколки, сгорающие в атмосфере [1].

Целью нашей работы является изучение двух методов изменения траектории потенциально-опасного астероида: с помощью гравитационного тягача и с использованием двигательной установки, установленной непосредственно на астероиде и использующей в качестве рабочего тела вещество астероида. Эти методы позволяют провести управляемое отклонение астероида с опасной траектории без использования сложных и не надежных методов захвата вращающегося астероида.

## 2. Моделирование функционирования систем противодействия астероидной опасности

### 2.1 Математическая модель функционирования системы противодействия астероидной опасности с помощью гравитационного тягача

Одним из методов отклонения астероидов с опасной орбиты является воздействие на него тяжелого космического аппарата (гравитационный тягач) силами гравитационного притяжения. Данный метод можно реализовать, если разместить в окрестности астероида управляемый КА с электроракетными двигателями. Такие КА разрабатываются, например, в ОАО «РКК «Энергия» для осуществления пилотируемых миссий к Луне и Марсу.

Для моделирования процесса изменения траектории потенциально опасного астероида разработана математическая модель движения двух притягивающих тел – астероида и КА с изменяемой массой и тягой в поле притяжения Солнца. На гравитационном тягаче установлен двигатель, который поддерживает неизменное положение тягача относительно астероида. Траектория астероида за счет гравитационного притяжения изменяется. Модель движения этих тел относительно Солнца имеет следующий вид (см. формулы (1-7)):

$$\text{Астероид: } \frac{d^2 \vec{r}_1}{dt^2} = -\frac{G \cdot m_2}{(r_1)^3} \cdot \vec{r}_1 - \frac{G \cdot m_3}{(r_{1-3})^3} \cdot (\vec{r}_1 - \vec{r}_3); \quad (1)$$

$$\text{Гравитационный тягач: } \frac{d^2 \vec{r}_3}{dt^2} = -\frac{G \cdot m_2}{(r_3)^3} \cdot \vec{r}_3 - \frac{G \cdot m_3}{(r_{1-3})^3} \cdot (\vec{r}_3 - \vec{r}_1) + \vec{a}; \quad (2)$$

$$\frac{dm_1}{dt} = 0; \quad (3)$$

$$\frac{dm_3}{dt} = -\alpha; \quad (4)$$

где

$$r_1 = \sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z_1^2}; \quad (5)$$

$$r_3 = \sqrt{x_3^2 + y_3^2 + z_3^2}; \quad (6)$$

$$r_{1-3} = \sqrt{(x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_1)^2 + (z_3 - z_1)^2}. \quad (7)$$

Здесь

$m_2$  - масса Солнца,

$m_3$  - масса тяжелого космического аппарата,

$r_1$  - расстояние между астероидом и Солнцем,

$r_3$  - расстояние между тяжелым космическим аппаратом и Солнцем,

$r_{3-1}$  - расстояние между тяжелым космическим аппаратом и астероидом,

$\bar{a}$  - ускорение от тяги КА,

$\alpha = \dot{m}$  - секундный расход рабочего тела.

Схема расположения тел и обозначения приведены на рисунке 1.

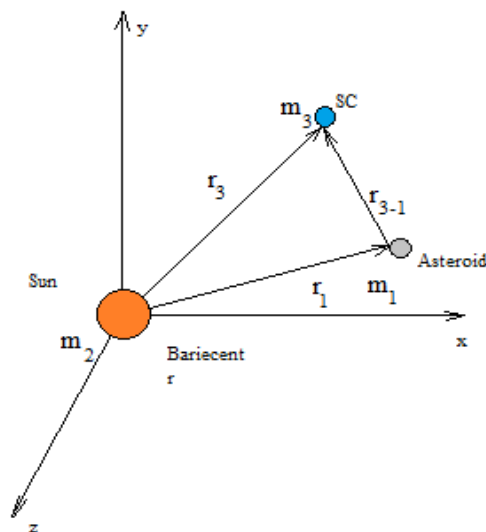


Рис. 1. Схема расположения тел и обозначения в методе предотвращения астероидной опасности с помощью гравитационного тягача.

## 2.2. Математическая модель функционирования системы противодействия астероидной опасности с размещением двигательной установки на астероиде

Еще одним методом преодоления астероидной опасности является размещение на астероиде солнечных источников энергии и электрореактивных двигателей, которые в качестве рабочего тела используют вещество астероида. В данной работе мы предполагали, что тяга этих двигателей может быть направлена по и против направления скорости астероида.

Для моделирования процессов отражения астероидной опасности были разработаны математическая модель, которые включают в себя уравнения движения астероида с изменяемой массой и реактивной тягой (см. формулы (8-9)):

$$\text{Астероид: } \frac{d^2 \bar{r}_1}{dt^2} = -G \cdot \frac{m_2}{r_1^3} \cdot \bar{r}_1 \pm \frac{P \cdot \bar{V}}{m_1 \cdot |\bar{V}|} \quad (8)$$

$$\frac{dm_1}{dt} = -\alpha \quad (9)$$

Здесь

$m_1$  - масса астероида,

$\bar{r}_1$  - расстояние между астероидом и Солнцем,

$P$  - тяга двигателя,  
 $\vec{V}$  - скорость астероида,  
 $\alpha = \dot{m}$  - секундный расход рабочего тела.

Схема расположения тел и обозначения приведены на рисунке 2.

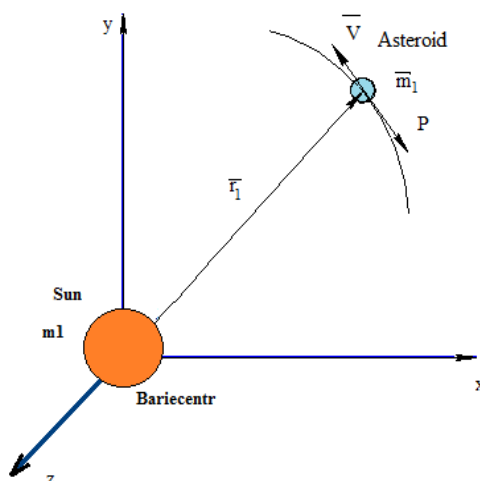


Рис. 2. Схема расположения тел и обозначения в методе предотвращения астероидной опасности с использованием реактивных двигателей.

### 3. Результаты моделирования

Для изучения и визуализации движения астероида нами был разработан программный комплекс в среде программирования Delphi. В программном комплексе можно задать необходимые характеристики реактивного двигателя или гравитационного тягача, выбрать из списка необходимый астероид, задать расход вещества астероида и ввести дату, на которую мы хотим увидеть орбиту выбранного астероида.

#### 3.1 Результаты моделирования для противодействия астероидной опасности при помощи гравитационного тягача

Моделирование движения тел осуществлялось численно, методом Рунге-Кутты четвертого порядка. Программный комплекс позволяет визуализировать траектории движения всех тел, входящих в систему. При моделировании изменения орбиты мы задавали следующие параметры тяжелого космического аппарата (тягача):

$$m=20000\text{ кг}, \alpha=0,5 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}, P=10\text{ Н}$$

Для расчетов был выбран астероид Апофис и его начальная орбита представлена на рисунке 3.

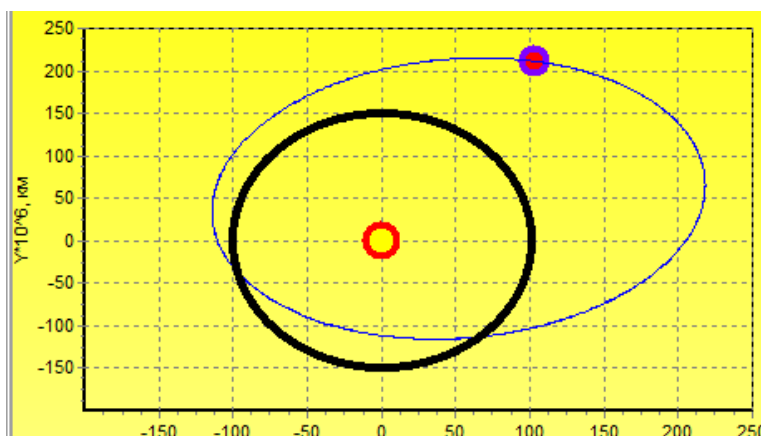


Рис. 3. Начальная орбита астероида.

На рисунке 4 представлено движение астероида под действие тягача.

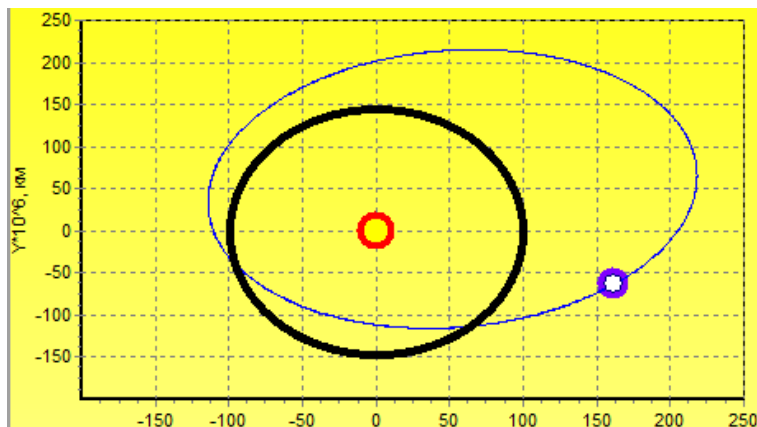


Рис. 4. Орбита астероида под действием гравитационного тягача.

На рисунке 5 представлено движение астероида под действием тяжелого космического аппарата без управления.

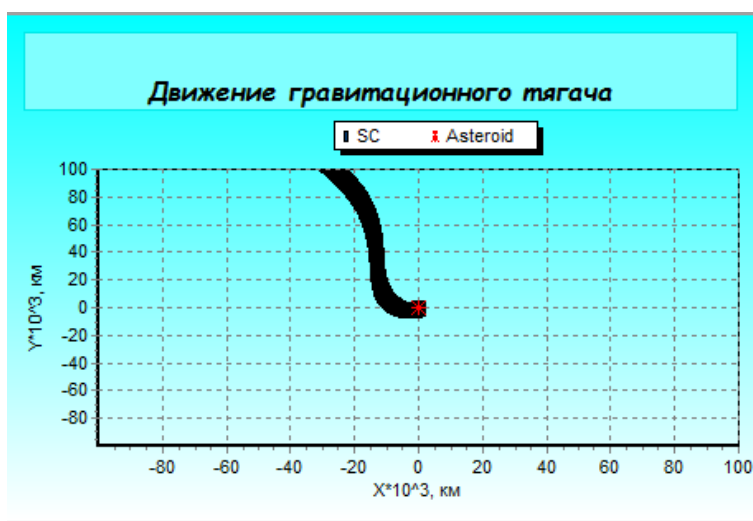


Рис. 5. Орбита астероида под действием гравитационного тягача без управления.

Из рисунка 5 видим, что тяжелый космический аппарат без управления не сможет долгое время двигаться по орбите астероида. Если взять в качестве управляющего ускорения возмущение от гравитации астероида, то КА может находиться в заданной точке относительно астероида длительное время. Такое управляющее воздействие использовалось при моделировании движения гравитационного тягача. График зависимости угла между векторами тяги и радиус-вектором КА представлен на рисунке 6.

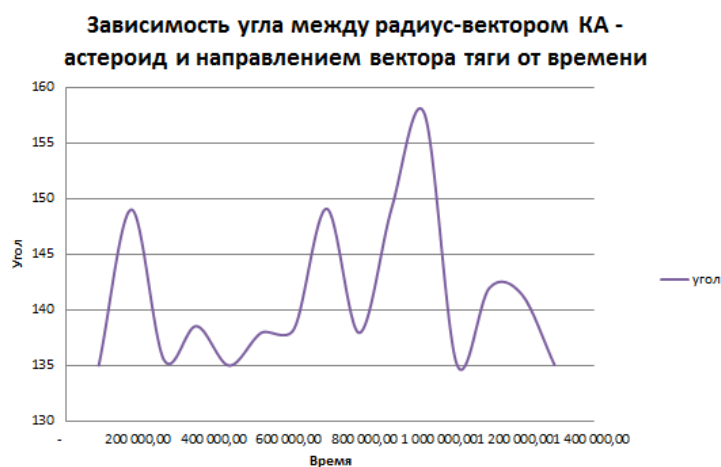


Рис. 6. Зависимость угла между радиус-вектором КА-астероид и направлением вектора тяги от времени.

На рисунках 7, 8, 9 представлены зависимости компонент векторов ускорения, скорости и перемещения КА от времени.

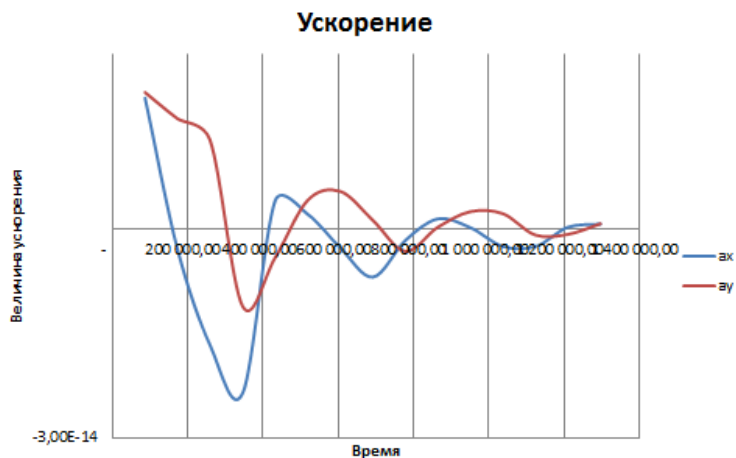


Рис. 7. Зависимость величины ускорения КА от времени.



Рис.8. Зависимость величины скорости КА с управлением от времени.

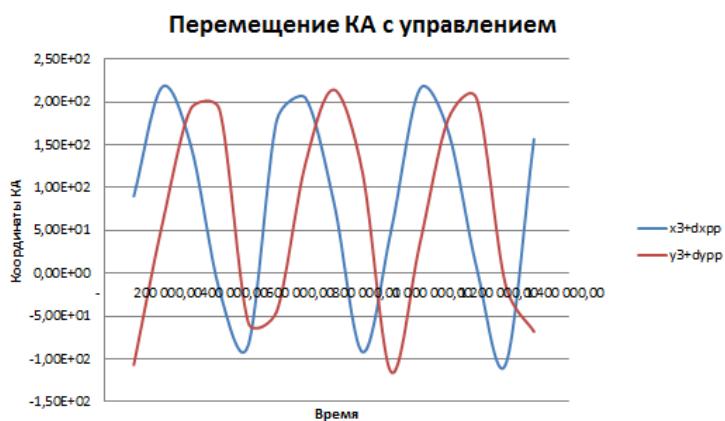


Рис. 9. Зависимость величины перемещения КА с управлением от времени.

С помощью программного комплекса были получены зависимости компонент векторов скорости и перемещения астероида от времени, которые представлены на рисунках 10 и 11.



Рис.10. Зависимость величины скорости астероида от времени.

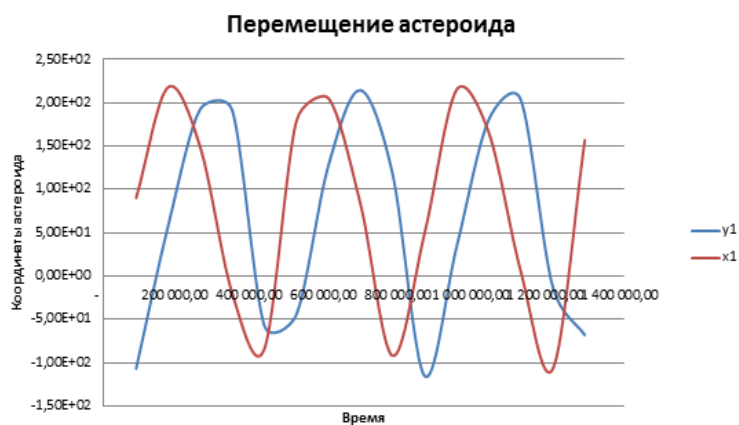


Рис. 11. Зависимость величины перемещения астероида от времени.

На рисунке 12 показано отклонение астероида с опасной траектории при времени действия тягача 5 лет.

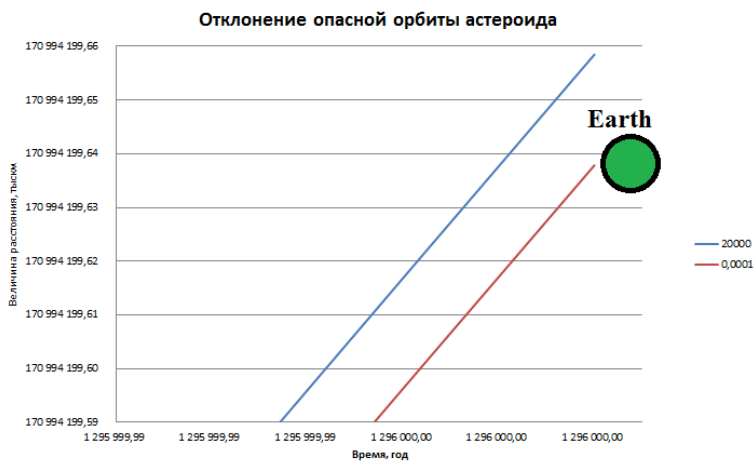


Рис. 12. Отклонение опасной орбиты астероида.

### 3.2 Результаты моделирования для противодействия астероидной опасности с размещением двигательной установки на астероиде

В ходе работы были выявлены необходимые характеристики реактивного двигателя: скорость истечения рабочего тела и мощность энергоустановки.

Скорость истечения рабочего тела рассчитывается по формуле:

$$c = \frac{P}{\dot{m}} \quad (10)$$

При моделировании изменения орбиты астероида с помощью размещения на нем реактивных двигателей мы задавали тягу  $P=1$  кг·м/с и массу  $\dot{m}=0.1$  кг/с, тогда скорость истечения рабочего тела будет равна  $c=10$  м/с.

Мощность энергоустановки рассчитываем по формуле:

$$N = c \cdot P / 2, \quad (11)$$

тогда  $N = 1 \cdot 10 / 2 = 5$  кВт.

Орбита Апофиса под влиянием тяги реактивного двигателя, направленной по скорости астероида, представлена на рисунке 13. Видно, что астероид за несколько лет уходит с опасной орбиты и перестает пересекать орбиту Земли.

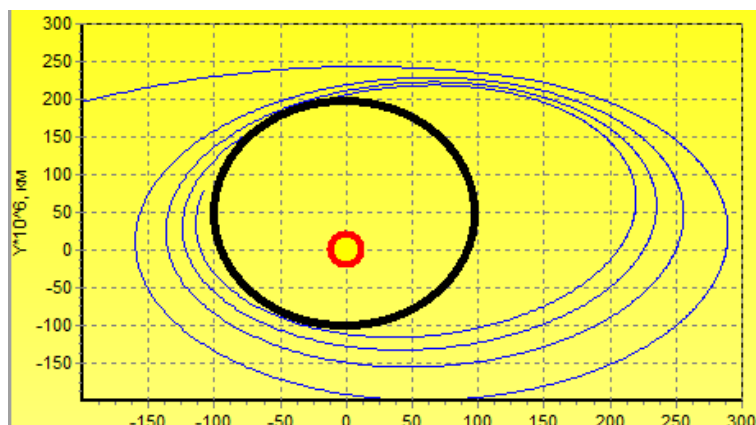


Рис. 13. Орбита астероида под влиянием тяги реактивного двигателя, направленной по скорости.

Орбита Апофиса под влиянием тяги реактивного двигателя, направленной против скорости астероида, представлена на рисунке 14. Результаты моделирования показывают, что для астероида Апофис применение тяги, направленной против скорости астероида неэффективно, так как траектория астероида продолжает пересекать орбиту Земли.

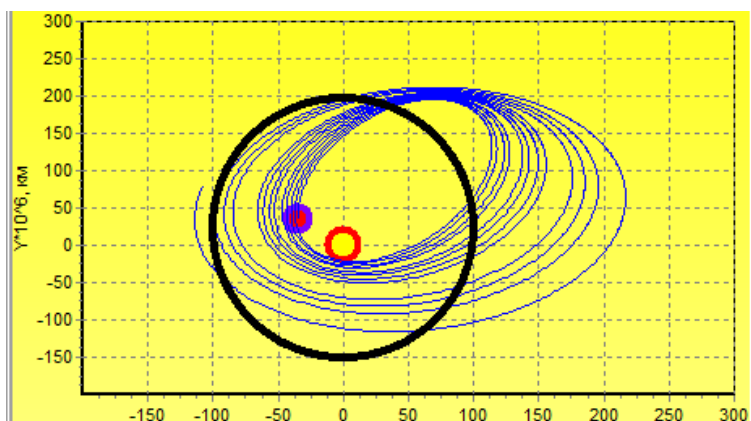


Рис. 14. Влиянием тяги реактивного двигателя, направленной против скорости астероида.

#### 4. Заключение

Анализируя проделанную работу, можем сделать выводы, что для преодоления астероидной опасности методом с реактивными двигателями, установленными на поверхности Апофиса, потребуется создание двигателей с заданными параметрами и способа превращения вещества астероида в реактивное топливо. Этот метод требует тщательной проработки, затрат времени подготовки и существенных материальных затрат. При расчетах с заданными параметрами реактивных двигателей, получаем, что удастся увести астероид с опасной орбиты за 10 лет с использованием тяги, направленной по скорости астероида.

При расчетах с заданными характеристиками тягача получаем, что увести Апофис с опасной орбиты можно менее чем за 5 лет. Таким образом, можем сделать выводы, что космический аппарат с такими расчетными характеристиками может быть использован в качестве противодействия астероидной опасности. Кроме того, такие проектно-баллистические характеристики имеют КА с электроракетными двигательными установками, проектирующимися ОАО «РКК Энергия», предназначенные для осуществления транспортных операций для Лунной программы. Это позволит использовать такой буксир и для отклонения от Земли потенциально опасного астероида.

## Литература

- [1] Энеев, Т.М. К вопросу об астероидной опасности / Т.М. Энеев.- М: Препринт ИПМ им. М.В.Келдыша, 2011. -№ 35. – С. 40-47.
- [2] Шустов, Б.М. Астероидно-кометная опасность: новые подходы / Б.М. Шустов, Л.В. Рыхлова. – М:Вестник Российской академии наук, 2009.-Т. 79. -№ 7. -С. 379-586.