

КОСМИЧЕСКАЯ ДИНАМИКА И НЕБЕСНАЯ МЕХАНИКА

Студент гр. 11403324 Э. П. Сазанчук

Научный руководитель – канд. техн. наук, доцент Микулик Т.Н.

Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

Введение

Космическая динамика и небесная механика – разделы теоретической механики и астрофизики, изучающие движение небесных тел под действием гравитационных сил. Эти дисциплины лежат в основе расчёта орбит спутников, планет, комет и галактик, а также играют ключевую роль в космонавтике и астрономии. Космическая динамика и небесная механика – фундаментальные разделы астрономии и астрофизики, изучающие движение небесных тел под действием гравитационных сил. Эти дисциплины лежат в основе расчета орбит планет, спутников, космических аппаратов, а также объяснения эволюции звездных и планетных систем [1].

Актуальность темы обусловлена развитием космических технологий, необходимостью точного прогнозирования траекторий искусственных спутников, межпланетных миссий и понимания долговременной динамики Солнечной системы. Кроме того, небесная механика играет ключевую роль в астрофизике, помогая моделировать двойные звезды, экзопланетные системы и галактическую динамику.

Цель работы – рассмотреть основные законы и методы космической динамики, проанализировать ключевые задачи небесной механики (например, задачу двух тел, ограниченную задачу трех тел) и показать их применение в современных исследованиях.

Задачи работы:

- изучить историческое развитие небесной механики (от Кеплера до современных теорий);
- разобрать математические основы орбитального движения;
- рассмотреть влияние возмущений на динамику небесных тел;
- проанализировать прикладные аспекты (расчет орбит спутников, межпланетные перелеты).

1. Основные законы и уравнения движения

1.1. Законы Кеплера

Иоганн Кеплер сформулировал три эмпирических закона движения планет 1609–1619:

1. Планеты движутся по эллиптическим орбитам, в одном из фокусов которых находится Солнце.

2. Радиус-вектор планеты за равные промежутки времени заметает равные площади (закон сохранения момента импульса) [2].

3. Квадраты периодов обращения планет относятся как кубы больших полуосей их орбит:

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3}.$$

Эти законы стали основой для Ньютоновской теории тяготения.

1.2. Закон всемирного тяготения Ньютона

Исаак Ньютон математически описал гравитационное взаимодействие:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

где G – гравитационная постоянная; m_1 и m_2 – массы тел; r – расстояние между ними.

На основе этого закона были выведены уравнения движения небесных тел, которые в общем виде записываются как

$$m \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} = -G \frac{mM}{r^3} \vec{r}.$$

Задача движения небесных тел является одной из фундаментальных проблем небесной механики и служит основой для понимания орбитального движения планет, спутников, звёзд в двойных системах и космических аппаратов. Её решение позволяет вывести законы Кеплера и получить точные аналитические выражения для траекторий небесных объектов [3].

2. Задача двух тел и её решения

Простейшая модель в небесной механике – задача двух тел, где рассматривается движение двух материальных точек под действием взаимного притяжения.

2.1. Интегралы движения

В задаче двух тел сохраняются:

- энергия (полная механическая энергия системы);
- момент импульса (орбитальное движение происходит в одной плоскости);
- вектор Лапласа–Рунге–Ленца (определяет ориентацию и форму орбиты) [4].

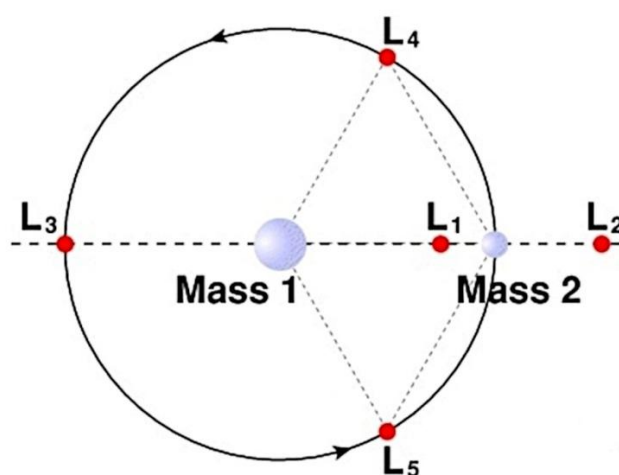
2.2. Виды орбит

В зависимости от энергии возможны следующие траектории:

- эллипс – замкнутая орбита, $E < 0$;
- парабола, $E = 0$, тело уходит на бесконечность;
- гипербола, $E > 0$, пролётная траектория.

3. Ограниченная задача трёх тел и точки Лагранжа

В реальности гравитационное взаимодействие происходит между множеством тел и даже трёхмерная задача не имеет общего аналитического решения. Однако ограниченная задача трёх тел (когда одно тело пренебрежимо мало) позволяет найти особые точки равновесия – точки Лагранжа (L_1 – L_5), рисунок [5].



L_1, L_2, L_3 – коллинеарные точки (неустойчивые);

L_4, L_5 – треугольные точки (устойчивы при определённых условиях)

Рисунок 1. - Точки Лагранжа

Эти точки используются для размещения космических аппаратов, например, телескоп James Webb в точке L_1 системы Солнце–Земля [6].

4. Возмущения орбит и современные приложения

4.1. Гравитационные возмущения

Реальные орбиты отличаются от кеплеровских вследствие:

- влияния других планет;
- несферичности Земли и других тел (экваториальное вздутие);
- релятивистских эффектов (например, смещение перигелия Меркурия).

4.2. Применение в космонавтике:

- расчёт траекторий спутников и межпланетных станций;
- гомановские переходные орбиты для экономии топлива;
- гравитационные манёвры (Voyager, Cassini) [7].

Пример расчёта

Дано: спутник массой 2000 кг, площадь панелей 20 м², альбедо 0,2. Начальное наклонение 0,05°.

Расчёт лунно-солнечного возмущения

Через пять лет

$$i = 0,05 + 0,85 \cdot 5 = 4,3.$$

Для возврата к $i \approx 0$ требуется $\Delta v = 4,3^\circ \cdot 50 \approx 215$ м/с.

Солнечное давление

сила $F \approx 9 \cdot 10^{-6} \cdot 20(1 + 0,2) \approx 2,16 \cdot 10^{-4}$ Н.

Ускорение

$$a = F / m \approx 2,16 \cdot 10^{-4} / 2 \cdot 10^3 = 1,08 \cdot 10^{-7} \text{ м/с}^2.$$

Проведенные расчеты демонстрируют влияние внешних факторов, таких как лунно-солнечные возмущения и солнечное давление, на динамику спутника. Результаты подтверждают необходимость применения методов

небесной механики для точного прогнозирования и управления орбитами космических аппаратов.

Заключение

Космическая динамика и небесная механика представляют собой мощный инструмент для понимания и предсказания движения объектов во Вселенной. Открытия Кеплера и Ньютона заложили основу для математического описания орбит, а современные методы (например, численное моделирование и теория хаоса) позволяют решать сложные задачи, такие как устойчивость Солнечной системы или проектирование космических миссий [8].

Основные выводы:

1. Законы Кеплера и ньютоновская механика остаются фундаментом для расчета орбит, но в сложных системах (например, при учете возмущений от других планет или несферичности Земли) требуются дополнительные методы.

2. Ограниченная задача трех тел и теория возмущений играют ключевую роль в проектировании траекторий космических аппаратов (например, использование точек Лагранжа) [9].

3. Современные технологии (спутниковая навигация, межпланетные зонды) напрямую зависят от точности расчетов в небесной механике.

Перспективы развития:

- учет релятивистских эффектов в высокоточных моделях;
- применение машинного обучения для анализа динамики сложных систем;
- исследование экзопланетных систем и галактической динамики с использованием методов небесной механики [10].

Таким образом, космическая динамика продолжает оставаться одной из самых востребованных областей науки, объединяющей теорию и практику в исследовании Вселенной.

Литература

1. Балк, М. Б. Элементы динамики космического полета / М. Б. Балк. — М.: Наука, 1965.

2. Дубошин, Г. Н. Небесная механика. Основные задачи и методы / Г. Н. Дубошин. – М.: Наука, 1968.
3. Мюррей, К. Динамика Солнечной системы / К. Мюррей, С. Дермотт. – М.: Физматлит, 2010.
4. Субботин, М. Ф. Введение в теоретическую астрономию / М. Ф. Субботин. – М.: Наука, 1968.
5. Кеплер, И. Новая астрономия. Избранные труды / И. Кеплер. – М.: Наука, 1988.
6. Ньютон, И. Математические начала натуральной философии / И. Ньютон. – М.: Наука, 1989.
7. Белецкий, В.В. Движение искусственного спутника относительно центра масс / В. В. Белецкий. – М.: Наука, 1965.
8. Маркеев, А. П. Теория движения искусственных спутников Земли / А. П. Маркеев. – М.: Наука, 1992.
9. Roy, A. E. Orbital Motion / A .E. Roy. – 4th ed. – Bristol: Institute of Physics Publishing, 2005.
10. Vallado, D. A. Fundamentals of Astrodynamics and Applications / D. A. Vallado. – 4th ed. – Microcosm Press, 2013.