

УДК 629.78.015(075)

ББК О62-015я7

Л930

Авторы: д-р техн. наук, профессор Лю Дунь,
д-р техн. наук, профессор Чжао Цзюнь

Лю, Дунь

Л930 **Динамика космического летательного аппарата:** учебное пособие / *Дунь Лю, Цзюнь Чжао*; пер. с китайского К. В. Петрухиной, Е. И. Сомова; под общ. ред. В. В. Салмина. – Самара: Издательство Самарского университета, 2023. – 580 с.: ил.

ISBN 978-5-7883-1910-0

Впервые издано на китайском языке под заголовком «Динамика космических аппаратов», авторы Лю Дунь и Чжао Цзюнь; © Издательство Харбинского политехнического университета, Co, Ltd.

Версия перевода и издание настоящего учебного пособия были выполнены с разрешения издательства Харбинского политехнического университета, Co, Ltd.

УДК 629.78.015(075)

ББК О62-015я7

ISBN 978-5-7883-1910-0

© Самарский университет, 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	11
ВВЕДЕНИЕ	15
ЧАСТЬ 1 РАСЧЕТ ТРАЕКТОРИЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ.....	19
1 Основные характеристики планет и элементы их орбит	20
2 Выведение космического аппарата на орбиту	22
2.1 Уравнения движения ракеты-носителя	22
2.1.1 Основные системы координат	22
2.1.2 Уравнения движения РН.....	25
2.2 Выбор закона управления	27
2.2.1 Участок начального разворота ракеты-носителя.....	27
2.2.2 Участок гравитационного разворота ракеты-носителя.....	28
3 Орбиты КА.....	33
3.1 Ограниченная задача двух тел.....	33
3.2 Движение в центральном гравитационном поле	39
3.2.1 Общие сведения	39
3.2.2 Круговая орбита.....	46
3.2.3 Эллиптическая орбита	47
3.2.4 Параболическая орбита.....	54
3.2.5 Гиперболическая орбита.....	58
4 Формирование орбит и построении трассы подспутниковой точки	63
4.1 Формирование орбиты	63
4.2 Связь между элементами орбиты и параметрами запуска ..	70
4.3 Трасса подспутниковой точки	76

4.4 Дальность полета баллистических ракет.....	80
5 Маневрирование на орбите	83
5.1 Классификация маневров межорбитальных переходов	83
5.2 Одноимпульсные маневры (компланарные переходы между пересекающимися орбитами)	84
5.2.1 Одноимпульсные маневры в плоскости орбиты.....	84
5.2.2 Потребная энергетика одноимпульсного маневра.....	89
5.3 Компланарный переход между непересекающимися орбитами	93
5.4 Орбитальные маневры с малой тягой	102
5.5 Сближение и встреча космических аппаратов	109
5.5.1 Задача встречи КА на круговой орбите	109
5.5.2 Задача встречи КА на эллиптической орбите	112
5.5.3 Задача встречи КА на некомпланарных орбитах.....	114
5.6 Межорбитальные переходы с помощью аэродинамического маневра	116
6 Межпланетные перелеты.....	127
6.1 Синодический период обращения и стартовые окна	127
6.2 Гравитационные сферы действия планет. Метод кусочно-конической аппроксимации	129
6.3 Пертурбационный маневр.....	134
6.4 Полет к Луне.....	139
6.5 Межпланетные перелеты	154
6.6 Ограниченная задача трех тел	165
7 Относительное движение, сближение и стыковка космических аппаратов	179
7.1 Уравнения относительного движения	179

7.1.1 Уравнения относительного движения в орбитальной системе координат	179
7.1.2 Уравнения относительного движения в полярной системе координат	185
7.2 Сближение и стыковка КА.....	189
8 Теория возмущенного движения КА	219
8.1 Потенциал поля тяготения Земли	219
8.1.1 Потенциал шара со сферическим распределением плотности.....	221
8.1.2 Потенциал эллипсоида вращения с однородным распределением плотности.....	225
8.2 Влияние возмущений на движение КА	231
8.2.1 Метод оскулирующих элементов	231
8.2.2 Переход к переменной $u = \omega + \theta$ в уравнениях в оскулирующих элементах.....	242
8.2.3 Компоненты возмущающего ускорения: касательное f_τ и нормальное f_σ	243
8.2.4 Сводка уравнений в оскулирующих элементах	244
8.3 Возмущенное движение КА.....	246
8.3.1 Возмущения, вызванные нецентральностью гравитационного поля Земли	246
8.3.2 Возмущения орбиты КА, вызываемые действием атмосферы. Определение времени существования КА на орбите.....	254
8.3.3 Возмущенное движение КА на геостационарной орбите (ГСО)	267
9 Спуск космических аппаратов	275
9.1 Процесс спуска КА	275
9.2 Классификация способов спуска ЛА	279

9.2.1 Баллистические ЛА	280
9.2.2 ЛА полубаллистического типа.....	281
9.2.3 ЛА с подъемной силой.....	282
9.3 Участок внеатмосферного полета	282
9.4 Уравнения движения ЛА в атмосфере.....	288
9.5 Перегрузка, нагрев и управление движением ЛА в атмосфере	292
9.5.1 Баллистический спуск.....	292
9.5.2 Полубаллистический спуск ЛА	298
9.5.3 Коридор входа и свойства аэродинамической перегрузки	308
9.5.4 Многократный проход через атмосферу	314
ЧАСТЬ 2 ДВИЖЕНИЕ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ВОКРУГ ЦЕНТРА МАСС	317
10 Кинематика движения ЛА вокруг центра масс	318
10.1 Основные системы координат	318
10.2 Углы Эйлера и матрица преобразования координат	320
10.3 Переход от связанной $Ox_{\text{уз}}$ к фиксированной системе координат Ox_b, y_b, z_b	333
11 Основные уравнения динамики движения космического аппарата вокруг центра масс	336
11.1 Кинетическая энергия.....	336
11.2 Угловой момент. Момент импульса	339
11.3 Уравнение Эйлера.....	341
11.4 Упрощение уравнений движения твердого КА относительно центра масс	343
12 Гравитационный момент и гравитационная стабилизация спутника	346

12.1 Гравитационный момент	346
12.2 Гравитационная стабилизация спутника на круговой орбите	352
12.3 Гравитационная стабилизация движения спутника по углу тангажа на круговых и околокруговых орбитах.....	357
12.4 Влияние потерь энергии на гравитационно- стабилизированный спутник.....	361
13 Космический аппарат, вращающийся вокруг одной из осей.....	375
13.1 Характеристики свободного вращения осесимметричного КА	376
13.2 Свободные вращения космического аппарата.....	386
13.3 Устойчивость вращения относительно осей инерции	391
13.4 Свободные вращения твердого тела с потерей энергии..	396
13.5 Влияние гравитационного момента на КА с одним вращением	399
13.6 Демпфирование колебаний в стабилизированном вращением КА	406
13.7 Два вида вынужденных движений вращающегося КА ...	419
14 КА с двойным вращением	426
14.1 Уравнения динамики КА.....	427
14.2 Движение КА с двойным вращением	437
14.3 Устойчивость КА	442
14.4 КА с двойным вращением с потерями энергии.....	446
14.5 Влияние гравитационного момента на КА	452
14.6 Демпфирование колебаний КА с двойным вращением...	455
15 КА с трехосной стабилизацией	473
15.1 Динамические уравнения КА с маховиками.....	473

15.2 Динамика неуправляемого движения КА с трехосной стабилизацией с маховиком.....	490
16 Космический аппарат с гибкими элементами	
и полостями, заполненными жидкостью.....	499
16.1 Динамические уравнения КА с гибкими элементами	500
16.1.1 Уравнения углового движения КА в векторной форме.....	501
16.1.2 Уравнения углового движения КА в компонентной форме.....	509
16.1.3 Решения упрощенных уравнений углового движения КА с гибкими элементами	512
16.2 КА с полостями, заполненными жидкостью	519
16.2.1 Уравнения углового движения КА в векторной форме.....	520
16.2.2 Уравнения углового движения КА в компонентной форме.....	524
ПРИЛОЖЕНИЯ	528
Приложение 1. Плотность атмосферы.....	528
Приложение 2. Формула Циолковского	532
Приложение 3. Векторы и векторные компоненты.....	535
Приложение 4. Момент инерции.....	549
Приложение 5. Векторные и тензорные производные	553
Приложение 6. Устойчивость и критерий Рауса-Гурвица	557
Приложение 7. Критерий устойчивости Гурвица	561
Приложение 8. Теорема об устойчивости по Ляпунову (вторая теорема)	563
Приложение 9. Основные теоремы об устойчивости движения	565