

УДК 629.78  
ББК 39.6  
М59

*Рецензенты:*

Научный руководитель ФГУП «ЦАГИ», д-р физ.-мат. наук, академик РАН  
*С.Л. Чернышев;*  
Начальник отдела ФГНУ «Научно-исследовательский институт прикладной  
механики и электродинамики», д-р техн. наук, профессор, чл.-корр. РАН  
*В.Г. Петухов*

**Микрин, Е. А.**

М59 Введение в механику полета и управление космическими аппаратами : учебник для вузов / Е. А. Микрин, Ф. В. Звягин. — Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2020. — 566, [2] с. : ил.

ISBN 978-5-7038-5276-7

Представлены основные сведения о технологическом цикле космических полетов, даны примеры практических задач, решаемых в процессе предварительного проектирования и управления полетом космических аппаратов и их группировок.

Для студентов, обучающихся по специальностям, связанным с управлением движением космических аппаратов; также может представлять интерес для специалистов в области проектирования космических полетов.

УДК 629.78  
ББК 39.6

ISBN 978-5-7038-5276-7

© Микрин Е.А., Звягин Ф.В., 2020  
© Оформление. Издательство  
МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020

## Оглавление

Предисловие .....	5
Список основных сокращений .....	7
Основные обозначения .....	7
Введение .....	10
<b>Глава 1. Основные сведения из кинематики и динамики твердого тела</b> .....	<b>13</b>
1.1. Кинематика .....	13
1.2. Масса, сила и законы Ньютона .....	18
1.2.1. Закон всемирного тяготения .....	18
1.2.2. Второй закон Ньютона, импульс и момент силы .....	20
1.3. Определение производных по времени для векторов постоянной длины .....	23
1.4. Уравнения движения в неинерциальных системах координат .....	27
Основные соотношения .....	35
Вопросы и задачи .....	37
<b>Глава 2. Задача двух тел</b> .....	<b>38</b>
2.1. Уравнения движения в инерциальной системе отсчета .....	39
2.2. Уравнения относительного движения .....	42
2.3. Угловой момент и формулы орбитального движения .....	46
2.3.1. Секториальная скорость. Второй закон Кеплера .....	48
2.3.2. Эксцентриситет орбиты .....	49
2.3.3. Уравнение орбиты. Первый закон Кеплера .....	51
2.3.4. Замечание о постоянных интегрирования .....	52
2.3.5. Скорости движения по орбите .....	52
2.4. Закон сохранения энергии .....	54
2.5. Круговые орбиты ( $e = 0$ ) .....	56
2.6. Эллиптические орбиты ( $0 < e < 1$ ) .....	60
2.6.1. Уравнение эллиптической орбиты в канонической форме .....	62
2.6.2. Период эллиптической орбиты. Третий закон Кеплера .....	64
2.6.3. Среднее расстояние между телами на эллиптической орбите .....	65
2.7. Параболические траектории ( $e = 1$ ) .....	71
2.8. Гиперболические траектории ( $e > 1$ ) .....	74
2.9. Перифокальная система координат .....	81
2.10. Функции Лагранжа .....	82
Основные соотношения .....	95
Вопросы и задачи .....	98
<b>Глава 3. Положение объекта на орбите как функция времени</b> .....	<b>99</b>
3.1. Время, прошедшее с момента прохождения перицентра .....	100
3.2. Круговые орбиты .....	101
3.3. Эллиптические орбиты .....	101
3.3.1. Средняя аномалия и среднее движение .....	102
3.3.2. Эксцентрическая аномалия и уравнение Кеплера .....	103

3.3.3. Итерационный метод Ньютона . . . . .	107
3.3.4. Алгоритм решения уравнения Кеплера . . . . .	107
3.3.5. Аппроксимация решения уравнения Кеплера рядами . . . . .	112
3.3.6. Усредненный по времени радиус эллиптической орбиты . . . . .	114
3.4. Параболические траектории . . . . .	115
3.5. Гиперболические траектории . . . . .	117
3.5.1. Гиперболическое уравнение Кеплера. . . . .	118
3.5.2. Решение гиперболического уравнения Кеплера методом Ньютона . . . . .	121
3.6. Универсальные переменные . . . . .	125
3.6.1. Использование универсального уравнения Кеплера . . . . .	128
3.6.2. Решение универсального уравнения Кеплера . . . . .	129
3.6.3. Использование функций Лагранжа и универсальных переменных для вычисления вектора состояния космического аппарата . . . . .	134
Основные соотношения. . . . .	137
Вопросы и задачи. . . . .	143
<b>Глава 4. Описание орбит космических аппаратов в трехмерном пространстве . . . . .</b>	<b>145</b>
4.1. Геоцентрическая система координат: углы прямого восхождения и склонения . . . . .	146
4.2. Вектор состояния и геоцентрическая экваториальная система координат . . . . .	150
4.3. Орбитальные элементы и вектор состояния. . . . .	154
4.4. Преобразование координат . . . . .	161
4.5. Преобразование между геоцентрической экваториальной и перифокальной системами координат . . . . .	168
4.6. Влияние сжатия Земли . . . . .	173
4.6.1. Солнечно-синхронные орбиты . . . . .	178
4.6.2. Орбиты высокоширотных спутников связи. . . . .	179
Основные соотношения. . . . .	186
Вопросы и задачи. . . . .	190
<b>Глава 5. Предварительное определение орбит . . . . .</b>	<b>191</b>
5.1. Метод Гиббса определения орбит по трем векторам положения. . . . .	192
5.2. Задача Ламберта . . . . .	199
5.3. Время и его измерение . . . . .	212
5.3.1. Основные определения . . . . .	212
5.3.2. Юлианские даты. . . . .	215
5.4. Топоцентрическая система координат . . . . .	219
5.5. Топоцентрическая экваториальная система координат. . . . .	223
5.6. Топоцентрическая пунктовая система координат . . . . .	225
5.7. Определение орбит по измерению угла и наклонной дальности. . . . .	230
5.8. Предварительное определение орбит только по измеренным углам. . . . .	238
5.9. Метод Гаусса предварительного определения орбиты . . . . .	239
5.9.1. Определение коэффициентов $c_1$ и $c_3$ . . . . .	240
5.9.2. Определение начального приближения компонент вектора состояния. . . . .	243
Основные соотношения. . . . .	255
Вопросы и задачи. . . . .	264

<b>Глава 6. Орбитальные маневры</b> .....	266
6.1. Импульсные маневры .....	267
6.2. Перелет Гомана .....	268
6.3. Биэллиптические перелеты .....	276
6.4. Фазирующие маневры .....	281
6.5. Негомановские перелеты между орбитами с общими линиями апсид .....	287
6.6. Поворот линии апсид .....	292
6.7. Маневры преследования .....	300
6.8. Маневры поворота плоскости орбиты .....	304
6.8.1. Ограничения, накладываемые расположением космодрома при выведении космического аппарата на орбиту .....	308
6.8.2. Трассы космических аппаратов .....	312
Основные соотношения .....	320
Вопросы и задачи .....	323
<b>Глава 7. Относительное движение и сближение космических аппаратов на орбите</b> .....	324
7.1. Относительное движение космического аппарата по орбите .....	325
7.2. Линеаризация уравнений относительного движения космического аппарата по орбите .....	331
7.3. Уравнения Клохесси — Уилтшира .....	333
7.3.1. Решение уравнений Клохесси — Уилтшира .....	335
7.3.2. Матричная форма записи уравнений Клохесси — Уилтшира .....	337
7.4. Двухимпульсные маневры сближения космических аппаратов .....	339
7.5. Относительное движение близких космических аппаратов по круговым орбитам .....	347
7.6. Методы наведения, используемые при сближении космических аппаратов .	350
7.7. Модель движения космических аппаратов в задаче сближения .....	353
7.8. Основные системы координат в задаче сближения космических аппаратов .	357
7.9. Общая постановка задач управления .....	360
7.10. Законы управления сближением космических аппаратов по методу параллельного наведения .....	360
7.10.1. Уравнения относительного движения космических аппаратов в визирной системе координат .....	360
7.10.2. Общий вид законов управления и методика их синтеза .....	364
7.10.3. Пример реализации метода параллельного сближения космических аппаратов .....	366
7.11. Метод свободных траекторий .....	371
7.11.1. Численное решение краевых задач методом стрельбы .....	371
7.11.2. Некоторые результаты численного решения задач сближения космических аппаратов .....	373
Основные соотношения .....	375
Вопросы и задачи .....	380

<b>Глава 8. Межпланетные полеты</b> . . . . .	381
8.1. Гомановские межпланетные перелеты . . . . .	382
8.2. Возможности для встречи космического аппарата с планетой . . . . .	384
8.3. Сфера действия . . . . .	389
8.4. Метод гравитационных сфер нулевой протяженности . . . . .	394
8.5. Отлет космического аппарата с планеты . . . . .	396
8.6. Анализ чувствительности орбиты к изменению параметров движения космического аппарата . . . . .	402
8.7. Встреча космического аппарата с планетой . . . . .	405
8.8. Пролет у планеты и гравитационный маневр . . . . .	413
8.9. Эфемериды планет . . . . .	426
8.10. Негомановские межпланетные траектории . . . . .	431
8.11. Проектирование межпланетных перелетов с использованием метода изолиний . . . . .	438
Основные соотношения . . . . .	443
Вопросы и задачи . . . . .	448
<b>Глава 9. Динамика реактивного движения</b> . . . . .	449
9.1. Уравнение движения при выведении космического аппарата на орбиту . . . . .	450
9.2. Уравнение реактивного движения . . . . .	453
9.3. Скорость и высота подъема ракеты . . . . .	456
9.4. Ограниченная постановка задачи определения параметров ракеты при движении в свободном пространстве . . . . .	459
9.4.1. Варианты компоновки ракет . . . . .	462
9.4.2. Движение многоступенчатых ракет . . . . .	463
9.5. Определение оптимального числа ступеней ракеты . . . . .	471
9.5.1. Использование неопределенных множителей Лагранжа для поиска экстремумов функций . . . . .	471
9.5.2. Оптимизация числа ступеней ракеты-носителя . . . . .	474
Основные соотношения . . . . .	481
Вопросы и задачи . . . . .	483
<b>Глава 10. Спуск космического аппарата в атмосфере</b> . . . . .	484
10.1. Основные положения . . . . .	484
10.2. Полет на внеатмосферном участке . . . . .	488
10.3. Атмосфера Земли . . . . .	495
10.4. Полные уравнения движения спускаемого аппарата в инерциальной системе координат . . . . .	496
10.5. Расчетные уравнения продольного движения спускаемого аппарата в атмосфере . . . . .	498
10.6. Режим установившегося спуска . . . . .	500

## Оглавление

10.7. Участок аэродинамического торможения. . . . .	501
10.7.1. Расчет продольной перегрузки . . . . .	501
10.7.2. Примеры численного моделирования . . . . .	502
Основные соотношения. . . . .	506
Вопросы и задачи. . . . .	511
<b>Глава 11. Ограниченная задача трех тел . . . . .</b>	<b>512</b>
11.1. Уравнения движения круговой ограниченной задачи трех тел . . . . .	513
11.2. Точки либрации . . . . .	517
11.3. Интеграл Якоби . . . . .	521
11.4. Модификации ограниченной задачи трех тел . . . . .	528
11.4.1. Уравнения эллиптической ограниченной задачи трех тел . . . . .	528
11.4.2. Уравнения бикруговой ограниченной задачи четырех тел. . . . .	529
11.5. Фазовый портрет круговой ограниченной задачи трех тел в окрестности меньшего притягивающего тела. . . . .	531
11.6. Динамические режимы задачи трех тел . . . . .	535
Основные соотношения. . . . .	544
Вопросы и задачи. . . . .	547
Литература . . . . .	548
Приложения . . . . .	550
Приложение 1. Параметры некоторых объектов Солнечной системы . . . . .	550
Приложение 2. Зависимости для определения элементов движения задачи двух тел. . . . .	552