

УДК 629.78  
ББК 32.965  
С41

**Сихарулидзе Ю. Г.**

**С41** Баллистика и наведение летательных аппаратов / Ю. Г. Сихарулидзе. — 5-е изд., электрон. — М. : Лаборатория знаний, 2024. — 407 с. — Систем. требования: Adobe Reader XI ; экран 10". — Загл. с титул. экрана. — Текст : электронный.

ISBN 978-5-93208-682-7

Рассматриваются классические и новые актуальные задачи теории полета летательных аппаратов, включая ракеты-носители и космические аппараты, спускаемые аппараты, баллистические ракеты и их головные части, межпланетные аппараты, многоразовые космические транспортные системы, авиационно-ракетные комплексы воздушного старта и др. Показана связь оптимальных законов управления в модельных задачах баллистики с реальными алгоритмами наведения в системах управления летательных аппаратов. Подробно рассматриваются терминальные алгоритмы наведения для различных фаз траектории, от активного участка до спуска в атмосфере и посадки. Обсуждаются также принципы построения робастных алгоритмов наведения, способных адаптироваться к фактическим условиям полета.

Книга является дополненной и расширенной версией изданной в 1982 г. книги автора «Баллистика летательных аппаратов» и рассчитана на специалистов в области баллистики и управления летательными аппаратами, а также на аспирантов и студентов соответствующих специальностей.

**УДК 629.78**  
**ББК 32.965**

**Деривативное издание на основе печатного аналога:** Баллистика и наведение летательных аппаратов / Ю. Г. Сихарулидзе. — М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. — 407 с. : ил. — ISBN 978-5-9963-0531-5.

Первый тираж осуществлен при финансовой поддержке  
Российского фонда фундаментальных исследований по проекту № 10-08-07039

**В соответствии со ст. 1299 и 1301 ГК РФ при устранении ограничений, установленных техническими средствами защиты авторских прав, правообладатель вправе требовать от нарушителя возмещения убытков или выплаты компенсации**

ISBN 978-5-93208-682-7

© Лаборатория знаний, 2015

<b>Введение</b>	<b>3</b>
<b>Глава 1. Уравнения движения</b>	<b>9</b>
1.1. Особенности уравнений движения ракеты как тела переменного состава	9
1.1.1. Уравнение движения центра масс ракеты	10
1.1.2. Уравнения движения ракеты относительно центра масс	11
1.2. Системы координат	13
1.2.1. Геоцентрическая сферическая система координат	13
1.2.2. Стартовая система координат	14
1.2.3. Связанная система координат	15
1.2.4. Скоростная система координат	16
1.2.5. Матрицы перехода между системами координат	17
1.3. Фигура и гравитационное поле Земли	20
1.3.1. Однородное плоскопараллельное поле	21
1.3.2. Центральное (ньютоновское) поле	21
1.3.3. Геоид, общий земной эллипсоид, референц-эллипсоид	22
1.4. Аэродинамические силы и моменты	23
1.4.1. Летательный аппарат с плоскостью симметрии	24
1.4.2. Осесимметричный ЛА	28
1.5. Стандартная атмосфера и модель вариаций ее параметров	31
1.5.1. Стандартная атмосфера	32
1.5.2. Сезонно-широтные и суточные вариации плотности	33
1.5.3. Предельные и случайные вариации плотности	35
1.5.4. Поле ветров	40
1.6. Управляющие силы и моменты	41
1.6.1. Органы управления	42
1.6.2. Каналы управления	43
1.7. Тяга двигателя	45
1.7.1. Изменение тяги двигателя по высоте	46
1.7.2. Удельная тяга	46
1.7.3. Коэффициент соотношения компонентов топлива	48
1.8. Уравнения движения в начальной стартовой (инерциальной) системе координат	51
1.8.1. Движение центра масс	52
1.8.2. Составляющие гравитационного ускорения	53
1.8.3. Составляющие тяги двигателей и аэродинамической силы	56
1.8.4. Уравнения движения ЛА относительно центра масс	57
1.8.5. Движение ЛА самолетного типа	60
Литература к главе 1	62

Глава 2. <b>Активный участок</b> .....	64
2.1. Основные участки траектории полета .....	64
2.1.1. Стартовый участок .....	65
2.1.2. Участок полета первой ступени .....	66
2.1.3. Разделение ступеней .....	67
2.1.4. Участки полета второй и последующих ступеней .....	70
2.1.5. Участок отделения полезной нагрузки .....	72
2.2. Оптимальная программа выведения на орбиту .....	73
2.2.1. Модельная задача о выборе программы выведения .....	73
2.2.2. Анализ структуры оптимального управления .....	78
2.2.3. Учет центрального поля притяжения .....	80
2.2.4. Программы тангажа и схемы выведения .....	85
2.3. Оптимальная программа баллистической стрельбы .....	90
2.3.1. Модельная задача о выборе программы стрельбы .....	90
2.3.2. Структура оптимального управления .....	92
2.3.3. Программа максимальной дальности .....	93
2.3.4. Программа минимального рассеивания .....	98
2.4. Интегрирование уравнений движения .....	101
2.4.1. Формула Циолковского .....	101
2.4.2. Приближенное интегрирование уравнений движения .....	103
2.4.3. Интегрирование уравнений движения с помощью ЭВМ .....	108
2.5. Производные конечной скорости, выводимой полезной нагрузки и дальности стрельбы по основным параметрам ЛА .....	111
2.5.1. Способы получения производных .....	111
2.5.2. Вычисление производных по конечным формулам .....	111
2.5.3. Использование производных в проектно-баллистических расчетах ..	114
Литература к главе 2 .....	116
Глава 3. <b>Баллистика головной части</b> .....	117
3.1. Прямая задача .....	117
3.1.1. Интегралы задачи движения в центральном поле .....	118
3.1.2. Внеатмосферная траектория полета .....	120
3.1.3. Определение координат точки падения ГЧ .....	124
3.2. Обратная задача .....	125
3.2.1. Определение потребных начальных условий полета ГЧ .....	125
3.2.2. Оптимальный угол бросания .....	126
3.2.3. Параметры движения на пассивном участке .....	130
3.3. Рассеивание головных частей .....	136
3.3.1. Влияние метода управления на ошибки начальных параметров дви- жения ГЧ .....	136
3.3.2. Производные дальности по начальным параметрам движения .....	136
3.3.3. Возмущение траектории полета ГЧ при входе в атмосферу .....	141
3.4. Способы уменьшения рассеивания .....	142
3.4.1. Управление полетом ГЧ на внеатмосферном участке .....	143
3.4.2. Управления полетом ГЧ в атмосфере .....	145
3.4.3. Характеристики головных частей баллистических ракет США .....	148
Литература к главе 3 .....	149

<b>Глава 4. Орбитальное движение космического аппарата в центральном поле</b>	<b>151</b>
4.1. Классификация невозмущенных траекторий	152
4.1.1. Эллиптическая орбита	155
4.1.2. Гиперболическая траектория	160
4.1.3. Параболическая траектория	164
4.1.4. Положение КА в пространстве	164
4.2. Компланарные маневры	165
4.2.1. Маневры с ограниченной тягой и импульсные маневры	165
4.2.2. Импульсные маневры между эллиптическими орбитами	167
4.2.3. Импульсные маневры между круговыми орбитами	169
4.3. Пространственные маневры	173
4.3.1. Поворот плоскости движения	174
4.3.2. Двухимпульсный маневр	174
4.3.3. Трехимпульсный маневр	178
4.3.4. Выведение стационарного спутника Земли	180
4.4. Задача встречи	184
4.4.1. Основные этапы встречи на орбите	184
4.4.2. Оптимальные режимы управления сближением	187
4.4.3. Случай круговой орбиты цели	190
4.4.4. Импульсные программы управления	194
4.4.5. Методы наведения с использованием линии визирования	196
Литература к главе 4	198
<b>Глава 5. Полет к Луне и планетам</b>	<b>200</b>
5.1. Анализ условий полета к Луне	200
5.1.1. Луна как спутник Земли	201
5.1.2. Задача трех тел. Сфера действия Луны	201
5.1.3. Приближенные методы расчета траекторий сближения	203
5.2. Полет к Луне	204
5.2.1. Плоская задача	205
5.2.2. Пространственная задача	209
5.2.3. Схемы полета с посадкой на Луну и последующим возвращением к Земле	212
5.3. Полет к планетам	216
5.3.1. Задача Ламберта	218
5.3.2. Гелиоцентрический и планетоцентрический участки	223
5.3.3. Классификация межпланетных траекторий	225
5.4. Оптимальные даты старта	227
5.4.1. Приближенный расчет даты старта	227
5.4.2. Условия перелета к ближним планетам	229
5.4.3. Последовательный облет нескольких планет	232
Литература к главе 5	235
<b>Глава 6. Вход в атмосферу и посадка</b>	<b>236</b>
6.1. Оптимальный маневр торможения на орбите	237
6.1.1. Оптимальная ориентация тормозного импульса	238
6.1.2. Торможение в апоцентре или перицентре эллиптической орбиты	242
6.1.3. Тормозной маневр на круговой орбите	247
6.1.4. Свойства оптимального маневра спуска с круговой орбиты	250

6.1.5. Оптимальная высота круговой орбиты для маневра спуска	251
6.2. Баллистическая траектория спуска с околокруговой скоростью входа	253
6.2.1. Максимальная перегрузка	254
6.2.2. Максимальный нагрев	258
6.3. Управляемая траектория СА с малым аэродинамическим качеством ( $k = 0.3$ )	261
6.3.1. Высота условного перигея и коридор входа	262
6.3.2. Траектория возвращения аппарата от Луны с параболической скоростью	265
6.3.3. Алгоритм наведения при входе с параболической скоростью	267
6.3.4. Траектория входа с гиперболической скоростью	270
6.4. Планирующий спуск в атмосфере	271
6.4.1. Оптимальное управление по углам атаки и крена	271
6.4.2. Боковой маневр с учетом ограничений по нагреву и перегрузке	277
6.5. Особенности спуска на планету Марс с разреженной атмосферой	282
6.5.1. Модель атмосферы Марса	282
6.5.2. Системы мягкой посадки	283
6.5.3. Оптимальные траектории спуска	285
6.6. Посадка на Луну	287
6.6.1. Оптимальная программа торможения	287
6.6.2. Посадка на Луну по программе «Аполлон»	290
Литература к главе 6	292
<b>Глава 7. Терминальное наведение</b>	<b>294</b>
7.1. Концепция терминального наведения	295
7.2. Терминальное наведение на активном участке	300
7.3. Наведение многоразового орбитального корабля при спуске в атмосфере	311
7.3.1. Фаза спуска	312
7.3.2. Уравнения для расчета дальности	314
7.3.3. Параметры опорной траектории	317
7.3.4. Алгоритм управления дальностью	320
7.3.5. Наведение и контроль траектории	323
7.3.6. Участок предпосадочного маневрирования и посадки	326
7.4. Алгоритм терминального наведения для посадки корабля-спасателя	327
7.4.1. Зона маневра и профиль опорного угла крена	328
7.4.2. Процедура терминального наведения	330
7.4.3. Сингулярное управление	332
7.5. Робастный алгоритм аэродинамического торможения в атмосфере Марса при выведении КА на орбиту спутника	335
7.5.1. Опорная зависимость угла крена и коридор входа	335
7.5.2. Алгоритм адаптации к возмущениям	340
7.5.3. Алгоритм терминального наведения	342
7.6. Методы верификации бортовых алгоритмов	344
Литература к главе 7	347
<b>Глава 8. Динамика воздушного старта</b>	<b>348</b>
8.1. Схемы полета	349
8.1.1. Особенности воздушного старта	349
8.1.2. Концепция воздушного старта	351
8.1.3. Основные проблемы воздушного старта	352

8.1.4. Два перспективных проекта: Quick Reach и «Воздушный старт» . . .	354
8.2. Анализ возмущений на участке вертикального маневра . . . . .	357
8.2.1. Стандартный порыв ветра . . . . .	357
8.2.2. Воздействие порыва ветра на угол атаки и перегрузку . . . . .	361
8.2.3. Струйный ветер и вариации плотности . . . . .	367
8.2.4. Вариации начальной массы СН . . . . .	369
8.2.5. Оценка параметров движения в точке страгивания . . . . .	370
8.3. Концепция наведения с компенсацией начальных ошибок . . . . .	372
8.3.1. Требования к орбитам . . . . .	373
8.3.2. Управление посредством изменения величины тяги двигателя КРБ .	374
8.4. Определение безопасного расстояния при включении маршевого двигателя первой ступени РН . . . . .	382
8.4.1. Модельная задача о движении РН в транспортно-пусковом контейнере . . . . .	382
8.4.2. Оценка мощности взрыва . . . . .	386
8.4.3. Оценка действия осколков на СН . . . . .	392
Литература к главе 8 . . . . .	393
Приложение 1. <b>Модель гравитационного поля Земли 4×4</b> . . . . .	395
Приложение 2. <b>Основные положения принципа максимума Л. С. Понтрягина [2.9, 4.23]</b> . . . . .	397