


**РАЗРАБОТКА СИСТЕМ
КОСМИЧЕСКИХ
АППАРАТОВ**



SPACECRAFT SYSTEMS ENGINEERING

4th edition

Editors
Peter Fortescue
Graham Swinerd
John Stark

РАЗРАБОТКА СИСТЕМ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Перевод с английского



Москва
2015

УДК 629.7.02
ББК 39.66
P17

P17 Разработка систем космических аппаратов / Под ред. П. Форгескью, Г. Суайнерда, Д. Старка; Пер. с англ. — М.: Альпина Паблишер, 2015. — 765 с.

ISBN 978-5-9614-2263-4

Настоящее издание рассматривает вопросы системного уровня (такие, как условия среды, анализ полета и разработка систем), а также содержит детальное описание элементов подсистем, формирующих основу конструкции космического аппарата. К ним относятся механические, электрические и температурные подсистемы, а также двигательная система и система контроля. Также значительное внимание уделено взаимодействию между элементами, которое оказывает огромное влияние на процесс создания всей конструкции.

Книга «Разработка систем космических аппаратов» вошла как пособие в учебные курсы во всем мире и заслужила признание не только студентов и преподавателей, но и исследователей и инженеров-практиков.

УДК 629.7.02
ББК 39.66

Все права защищены. Никакая часть этой книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами, включая размещение в сети Интернет и в корпоративных сетях, а также запись в память ЭВМ для частного или публичного использования, без письменного разрешения владельца авторских прав. По вопросу организации доступа к электронной библиотеке издательства обращайтесь по адресу mylib@alpina.ru

© John Wiley & Sons, Ltd, 2011
All Rights Reserved. Authorised translation from the English language edition published by John Wiley & Sons Limited. Responsibility for the accuracy of the translation rest solely with ООО "Alpina" and is not responsibility of John Wiley & Sons Limited. No part of this book may be reproduced in any form without written permission of the original copyright holder, John Wiley & Sons Limited.

ISBN 978-5-9614-2263-4 (рус.)
ISBN 978-0-470-75012-4 (англ.)

© Издание на русском языке, перевод, оформление.
ООО «Альпина Паблишер», 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

Список авторов	10
Предисловие к четвертому изданию	11
Предисловие к третьему изданию	14
Предисловие ко второму изданию	16
Предисловие к первому изданию	17
От партнера российского издания	19
ГЛАВА 1. ВВЕДЕНИЕ	21
1.1. ФУНКЦИИ И МИССИИ	23
1.2. КОСМИЧЕСКИЙ АППАРАТ КАК СИСТЕМА	25
1.3. БУДУЩЕЕ	29
ГЛАВА 2. ВЛИЯНИЕ СРЕДЫ НА КОНСТРУКЦИЮ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА	32
2.1. ВВЕДЕНИЕ	32
2.2. СРЕДА, В КОТОРОЙ НАХОДИТСЯ КОСМИЧЕСКИЙ АППАРАТ ДО НАЧАЛА РАБОТЫ	33
2.3. УСЛОВИЯ, В КОТОРЫХ ФУНКЦИОНИРУЕТ КОСМИЧЕСКИЙ АППАРАТ	39
2.4. ВЛИЯНИЕ СРЕДЫ НА КОНСТРУКЦИЮ	63
ГЛАВА 3. ДИНАМИКА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА	73
3.1. ВВЕДЕНИЕ	73
3.2. ДИНАМИКА ТРАЕКТОРИИ	75
3.3. ОБЩАЯ ДИНАМИКА ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПОЛОЖЕНИЯ	83
3.4. УГЛОВОЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЕ ОПРЕДЕЛЕННЫХ ТИПОВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ	88
3.5. РЕЖИМЫ КОЛЕБАНИЙ	98
3.6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ	100
ПРИЛОЖЕНИЕ: МАТРИЦА ИНЕРЦИИ	101
ГЛАВА 4. НЕБЕСНАЯ МЕХАНИКА	106
4.1. ВВЕДЕНИЕ	106
4.2. ЗАДАЧА ДВУХ ТЕЛ — ДИНАМИКА ЧАСТИЦ	108
4.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОРБИТЫ	119
4.4. ВОЗМУЩЕНИЯ ОРБИТЫ	121
4.5. ОГРАНИЧЕННАЯ ЗАДАЧА ТРЕХ ТЕЛ	135
ГЛАВА 5. АНАЛИЗ ПОЛЕТА	139
5.1. ВВЕДЕНИЕ	139
5.2. ДВИЖЕНИЕ ПО КЕПЛЕРОВСКИМ ОРБИТАМ	142
5.3. АНАЛИЗ ПОЛЕТА	144
5.4. ПОЛЯРНЫЕ СПУТНИКИ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ НА ОКОЛОЗЕМНЫХ ОРБИТАХ	151
5.5. СОЗВЕЗДИЯ СПУТНИКОВ	156
5.6. ГЕОСТАЦИОНАРНАЯ ОРБИТА	163
5.7. ВЫГЯНУТЫЕ ЭЛЛИПТИЧЕСКИЕ ОРБИТЫ	174
5.8. МЕЖПЛАНЕТНЫЕ МИССИИ	178
ГЛАВА 6. ДВИГАТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ	211
6.1. КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМ	211
6.2. ХИМИЧЕСКИЕ РАКЕТЫ	214

6.3. ДВИЖЕНИЕ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА.....	237
6.4. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДВИГАТЕЛИ.....	242
ГЛАВА 7. РАКЕТЫ-НОСИТЕЛИ.....	257
7.1. ВВЕДЕНИЕ	257
7.2. РАБОТА ОСНОВНЫХ ВИДОВ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ.....	257
7.3. ФАЗА ЗАПУСКА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА И ПЛАНИРОВАНИЕ ПОЛЕТА.....	267
7.4. РАКЕТА-НОСИТЕЛЬ «АРИАН-5».....	272
7.5. СИСТЕМЫ ЗАПУСКА ПИЛОТИРУЕМЫХ АППАРАТОВ В США.....	276
7.6. МАЛЫЕ СРЕДСТВА ВЫВЕДЕНИЯ И МНОГОРАЗОВЫЕ СУБОРБИТАЛЬНЫЕ АППАРАТЫ	280
7.7. ВОЗВРАЩЕНИЕ В ЗЕМНУЮ АТМОСФЕРУ	281
7.8. ЗАТРАТЫ, СВЯЗАННЫЕ С ЗАПУСКОМ, И ВОПРОСЫ НАДЕЖНОСТИ.....	284
ГЛАВА 8. КОНСТРУКЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА.....	289
8.1. ВВЕДЕНИЕ	289
8.2. ТРЕБОВАНИЯ К КОНСТРУКЦИИ	289
8.3. ВЫБОР МАТЕРИАЛОВ.....	294
8.4. АНАЛИЗ	304
8.5. ВЕРИФИКАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ.....	317
8.6. ЗАЩИТА ОТ ВНЕШНЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ	319
8.7. ПРИМЕРЫ КОНФИГУРАЦИИ	321
8.8. БУДУЩЕЕ КОСМИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ	328
ГЛАВА 9. КОНТРОЛЬ ОРИЕНТАЦИИ	332
9.1. ВВЕДЕНИЕ	332
9.2. ОБЗОР СОЗ	333
9.3. ИЗМЕНЕНИЕ ОРИЕНТАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА.....	337
9.4. КРУТЯЩИЕ МОМЕНТЫ И ВРАЩАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА	345
9.5. ИЗМЕРЕНИЕ ОРИЕНТАЦИИ.....	354
9.6. РАСЧЕТЫ СОЗ.....	367
ГЛАВА 10. ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ	375
10.1. ВВЕДЕНИЕ	375
10.2. ЭЛЕМЕНТЫ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ.....	376
10.3. ОСНОВНЫЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ	378
10.4. ВТОРИЧНЫЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ: БАТАРЕИ	395
10.5. УПРАВЛЕНИЕ, РАСПРЕДЕЛЕНИЕ И КОНТРОЛЬ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ	398
10.6. БЮДЖЕТ МОЩНОСТИ	401
ГЛАВА 11. СИСТЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА.....	408
11.1. ВВЕДЕНИЕ	408
11.2. ТЕПЛОВАЯ СРЕДА	409
11.3. ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС	414
11.4. ТЕПЛОВОЙ АНАЛИЗ	418
11.5. ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ	424
11.6. ТЕПЛОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ.....	428
11.7. ВЕРИФИКАЦИЯ СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА	442
11.8. ПРИМЕР ПРОЕКТА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ДЛЯ СПУТНИКА ХММ/«НЬЮТОН»	444
ГЛАВА 12. ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ	450
12.1. ВВЕДЕНИЕ	450
12.2. МЕТОДЫ РАДИОСВЯЗИ	456

12.3. ПОЛЕЗНАЯ НАГРУЗКА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СВЯЗИ.....	478
12.4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	494
ГЛАВА 13. ТЕЛЕМЕТРИЯ, КОМАНДЫ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ	499
13.1. ВВЕДЕНИЕ	499
13.2. СИСТЕМНАЯ АРХИТЕКТУРА.....	500
13.3. ФОРМАТЫ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ	502
13.4. ТЕЛЕКОМАНДЫ	511
13.5. МЕТОДЫ СВЯЗИ И ПРОТОКОЛЫ	518
13.6. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ДАННЫМИ И ИХ ОБРАБОТКИ НА БОРТУ (ОВДН)	522
13.7. ТЕХНОЛОГИЯ	528
13.8. ИНСТРУМЕНТЫ И КОНТРОЛИРУЮЩАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ	530
ГЛАВА 14. НАЗЕМНЫЙ СЕГМЕНТ.....	533
14.1. ВВЕДЕНИЕ	533
14.2. НАЗЕМНАЯ СТАНЦИЯ	534
14.3. ДИНАМИКА ПОЛЕТА	542
14.4. СИСТЕМА НАЗЕМНОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ	547
14.5. СИСТЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЛЕТОВ.....	551
ГЛАВА 15. МЕХАНИЗМЫ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА	565
15.1. ВВЕДЕНИЕ	565
15.2. ОДНОРАЗОВЫЕ УСТРОЙСТВА.....	567
15.3. ПОСТОЯННО И НЕПОСТОЯННО РАБОТАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА	578
15.4. КОМПОНЕНТЫ.....	584
15.5. МАТЕРИАЛЫ	590
15.6. ТРИБОЛОГИЯ.....	592
15.7. ИСПЫТАНИЯ И ВЕРИФИКАЦИЯ	593
15.8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	595
ГЛАВА 16. ИНЖЕНЕРНЫЕ ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА.....	599
16.1. ВВЕДЕНИЕ	599
16.2. ПРИМЕРЫ ПРОБЛЕМ, СВЯЗАННЫХ С ЭМС	600
16.3. СПЕЦИФИКАЦИЯ ЭМС	600
16.4. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ — ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ.....	601
16.5. ОСНОВЫ ЭМС	602
16.6. СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ЭМС.....	603
16.7. КАТЕГОРИИ ЭМС	604
16.8. ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЙ РАЗРЯД.....	608
16.9. СХЕМЫ ЗАЗЕМЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА	609
16.10. ОСНОВНЫЕ ПРИЧИНЫ ПРОБЛЕМ КОСМИЧЕСКИХ КОРАБЛЕЙ В ОБЛАСТИ ЭМС	614
16.11. АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИНЖИНИРИНГА ДЛЯ ЭМС КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА..	616
ГЛАВА 17. СБОРКА, ИНТЕГРАЦИЯ И ВЕРИФИКАЦИЯ	618
17.1. ВВЕДЕНИЕ	618
17.2. ОПРЕДЕЛЕНИЯ.....	618
17.3. ПЛАН ВЕРИФИКАЦИИ.....	621
17.4. СВЯЗЬ МЕЖДУ АНАЛИЗОМ И ИСПЫТАНИЕМ	625
17.5. ПЛАН АІV	626
17.6. ИСПЫТАНИЯ: ОСНОВЫ.....	628
17.7. ТИПЫ ИСПЫТАНИЙ.....	632
17.8. ФИЛОСОФИЯ МОДЕЛИ.....	637

17.9. СТРОИТЕЛЬНЫЕ СТАНДАРТЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ	640
17.10. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ НАЗЕМНОЙ ПОДДЕРЖКИ.....	643
17.11. КОНТРОЛЬНЫЕ ТОЧКИ ПРОГРАММЫ ATV.....	649
17.12. ЗАВЕРШЕНИЕ ВЕРИФИКАЦИИ	650
17.13. ПОДГОТОВКА К ЗАПУСКУ	650
17.14. ЗАКЛЮЧЕНИЕ	651
ГЛАВА 18. РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ МАЛЫХ СПУТНИКОВ	653
18.1. ВВЕДЕНИЕ	653
18.2. МАЛЫЕ СПУТНИКИ: КОНСТРУКТОРСКАЯ ФИЛОСОФИЯ	657
18.3. КОНСТРУКЦИЯ СИСТЕМ МАЛЫХ СПУТНИКОВ	659
18.4. «КОРОБОЧНЫЕ» КОМПОНЕНТЫ В КОСМИЧЕСКОЙ СРЕДЕ.....	661
18.5. МИКРОСПУТНИКОВЫЕ ПЛАТФОРМЫ.....	666
18.6. МИНИ-СПУТНИКОВЫЕ ПЛАТФОРМЫ	669
18.7. НАНОСПУТНИКОВЫЕ ПЛАТФОРМЫ	671
18.8. СИСТЕМЫ ЗАПУСКА, ПОДХОДЯЩИЕ ДЛЯ МАЛЫХ СПУТНИКОВ.....	672
18.9. РАБОТА НА ОРБИТЕ.....	675
18.10. СФЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ МАЛЫХ СПУТНИКОВ.....	677
18.11. ПИКОСПУТНИКИ И НЕДАВНИЕ ДОСТИЖЕНИЯ МИНИАТЮРИЗАЦИИ	684
18.12. ЗАКЛЮЧЕНИЕ	684
ГЛАВА 19. КАЧЕСТВО ПРОДУКТА.....	686
19.1. ВВЕДЕНИЕ	686
19.2. КАЧЕСТВО ПРОДУКТА В РАМКАХ ПРОЕКТА.....	688
19.3. НАДЕЖНОСТЬ/ЗАВИСИМОСТЬ.....	694
19.4. ДЕТАЛИ	700
19.5. МАТЕРИАЛЫ И ПРОЦЕССЫ.....	704
19.6. КАЧЕСТВО ПРОДУКТА: ПРОИЗВОДСТВО, АНАЛИЗ, ВЕРИФИКАЦИЯ И ИНТЕГРАЦИЯ	708
19.7. БЕЗОПАСНОСТЬ.....	716
19.8. КАЧЕСТВО ПРОДУКТА В ОПЕРАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ	719
19.9. КАЧЕСТВО ПРОГРАММНОГО ПРОДУКТА	721
19.10. КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА В ПРОЦЕССЕ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ	724
19.11. НЕСКОЛЬКО СЛОВ О ГАРАНТИЯХ	726
ГЛАВА 20. ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА	727
20.1. ВВЕДЕНИЕ	727
20.2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМ	728
20.3. ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ	739
20.4. ПРИМЕР РЕАЛИЗАЦИИ: СПУТНИК CRYOSAT	751
20.5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	764

*Памяти Ники Скиннер
(1978–2011)*

СПИСОК АВТОРОВ

РЕДАКТОРЫ

Питер Фортескью

Отделение аэронавтики и астронавтики, факультет инженерных наук и окружающей среды, Университет Саутгемптона (в отставке)

Грэм Суайнерд

Отделение аэронавтики и астронавтики, факультет инженерных наук и окружающей среды, Университет Саутгемптона

АВТОРЫ

Гульельмо Альетти

Отделение аэронавтики и астронавтики, факультет инженерных наук и окружающей среды, Университет Саутгемптона

Массимо Бандекки

Европейский центр космических исследований и технологий (ESTEC), Европейское космическое агентство (ESA), Нидерланды

Франк Шатель

Германский центр космических операций (GSOC), Оберпфaffenхофен, Германия

Грэм Доррингтон

Школа инженерных наук и материаловедения, Колледж королевы Марии, Лондонский университет

Джон Фарроу

Международный институт космоса, Страсбург, Франция

Найджел Филлери

EADS Astrium, Портсмут, Великобритания

Ричард Фрэнсис

Европейский центр космических исследований и технологий (ESTEC), Европейское космическое агентство (ESA), Нидерланды

Джеффри Холл

Moreton Hall Associates, Мейденхед, Великобритания

Джон Хотон

EADS Astrium, Стивенидж, Великобритания

Джон Старк

Школа инженерных наук и материаловедения, Колледж королевы Марии, Лондонский университет

Барри Мосс

Школа инженерных наук, Университет Кренфилда, Великобритания

Терри Рэнсом

EADS Astrium, Стивенидж, Великобритания (в отставке)

Кен Редфорд

British Aerospace, Бристоль, Великобритания

Крис Сэвидж

Европейский центр космических исследований и технологий (ESTEC), Европейское космическое агентство (ESA), Нидерланды (в отставке)

Рэй Шерифф

Школа инженерных наук, дизайна и технологии, Университет Брэдфорда, Великобритания

Дэвид Стэнтон

Keltik Ltd, Хэмптон-Хилл, Великобритания

Мартин Свининг

Surrey Space Centre, Университет Суррея, Гилфорд, Суррей, Великобритания

Адриан Тэтнелл

Отделение аэронавтики и астронавтики, факультет инженерных наук и окружающей среды, Университет Саутгемптона

Крейг Андервуд

Surrey Space Centre, Университет Суррея, Гилфорд, Суррей, Великобритания

ПРЕДИСЛОВИЕ К ЧЕТВЕРТОМУ ИЗДАНИЮ

Размышляя над предисловием к нынешнему, четвертому изданию, я внимательно изучил все предыдущие, чтобы снова проникнуться духом того времени, вспомнить, как два десятка лет тому назад увидело свет первое издание. Разумеется, за этот период произошло множество изменений, которые нашли отражение в книге. Однако при этом мы, вне всякого сомнения, не могли не сказать о том влиянии, которое оказала на развитие комической отрасли программа «Шаттл» («рабочие лошадки» для пилотируемых полетов в странах Запада).

Для меня первый запуск «Шаттла», состоявшийся три десятилетия назад, в 1981 году, стал одним из тех примечательных событий, которые позволяют точно вспомнить, где вы были и чем занимались в тот момент. Я помню 12 апреля 1981 года, прекрасный весенний день, мы с женой бродим в горах Шотландии. А вечером — новые сообщения, мы узнаем подробности об историческом полете «Колумбии». История программы «космических челноков» хорошо задокументирована. Несмотря на высокие затраты, она была успешной (хотя и сопровождалась трагическими случаями, приводившими к человеческим жертвам). Но круг замкнулся: мы вынуждены наблюдать за тем, как эта прекрасная программа прекращает свою работу. И здесь мои личные впечатления вновь пересекаются с ощущениями, которые испытывают многие мои коллеги, — завершение полетов шаттлов совпало с прекращением моей научной и практической карьеры.

Отказ от шаттлов — это пересмотр всей программы пилотируемых космических полетов в США. Администрация президента Буша выдвинула новую программу — «Созвездие», в центре которой должен был находиться пилотируемый космический аппарат «Орион», выводимый на орбиту ракетой-носителем «Арес-1», которая пришла на смену шаттлу. Другим существенным компонентом проекта была мощная ракета-носитель «Арес-5», способная выводить в космос значительные объемы полезной нагрузки. Одна из основных целей — к 2020 году повторить экспедицию на Луну. Вторая цель — подготовка к пилотируемому полету на Марс в отдаленной перспективе. Однако администрация следующего президента, Обамы, отказалась от планов Буша и передала освоение космоса частному бизнесу. В результате выход человека за пределы земной орбиты отложен, а срок жизни Международной космической станции (МКС) продлен до 2020 года. Это привело к довольно неприятной ситуации — вся деятельность пилотируемых экипажей США сконцентрирована на земной орбите, однако у США нет собственных средств для отправки экипажей в космос. На момент написания этой книги будущее пилотируемых полетов в США довольно туманно, и мы не исключаем, что новые следы человека на поверхности Луны оставят китайские тайконавты. Но для рассмотрения этого аспекта космической деятельности еще не пришло время, и он выходит за рамки основной темы данной книги.

К примеру, в данном издании рассказ о шаттлах сведен до минимума, а основное внимание в разделе о ракетах-носителях (глава 7) уделяется европейской

программе «Ариан». (Хотя в книге и содержится обсуждение «Арес» — со временем степень его уместности станет более ясной.)

Основная часть книги посвящена конструкциям и инженерной работе, связанной с беспилотными космическими аппаратами. С началом нового тысячелетия философия создания космических аппаратов, выражающаяся словами «быстрее, лучше и дешевле», получила новый импульс, особенно в отношении снижения массы и размеров. Однако несколько серьезных сбоев показали, что «быстрее и дешевле» не всегда означает «лучше». При этом интерес к небольшим и функциональным космическим аппаратам не спадает, что отражено в обновленной главе 18 — об инженерии малых спутников.

С другой стороны, в настоящее время разрабатываются масштабные роботизированные космические программы, которые, возможно, будут реализованы уже после того, как это издание займет место на полках. В первую очередь, речь о космическом телескопе «Хаббл», преемником которого стал телескоп имени Джеймса Уэбба. Он будет запущен, предположительно, в 2014 году в точку Лагранжа L2, расположенную примерно в 1,5 млн км от Земли. С помощью зеркала, размер которого в три раза превышает зеркало «Хаббла», ученые надеются сделать новые открытия в космологии. Скоро начнет движение вокруг кометы 67P/Чурюмова — Герасименко космический аппарат ESA «Розетта». Полученные данные должны помочь нам лучше понять происхождение Солнечной системы. Ожидается, что в 2014 году начнет работу новая глобальная система спутниковой навигации под названием «Галилео». Эта гражданская программа, финансируемая Евросоюзом, предполагает запуск созвездия из 30 спутников, которые будут вращаться вокруг Земли на высоте около 23 000 км. Важным следствием развития новой системы спутниковой навигации будет значительное улучшение воздушного контроля в гражданской авиации.

Четвертое издание книги «Разработка систем космических аппаратов» значительно дополнено и обновлено, что позволяет читателям изучить вопросы, связанные с беспилотными космическими аппаратами, — от первых шагов в конструировании до деятельности на орбите. Особого внимания заслуживает ряд совершенно новых свойств. Нынешние тенденции развития межпланетных полетов связаны с траекториями с низкой тягой, и мы посчитали правильным добавить информацию об этом в большой главе, посвященной их анализу (глава 5). Заново написана глава 14, рассказывающая о работе наземных станций. В нынешней версии она получила название «Наземный сегмент», чтобы подчеркнуть: речь не только о работе наземной станции, но и о других аспектах, таких, как дистанционное управление полетом. Добавлена новая глава (глава 17) — о сборке, интеграции и верификации. Описанные в ней операции проводятся на более поздних этапах разработки космического аппарата, когда всю систему сводят воедино и испытывают перед стартом. Полностью переписана глава 19, посвященная качеству продукта. В ней рассмотрены новые аспекты этой важнейшей темы, включая программное обеспечение. Качество программных продуктов жизненно важно, поскольку они проводят многие годы во враждебной среде без какой-либо возможности обслуживания.

Последняя глава, где рассматривается проектирование космического аппарата (глава 20), также написана заново. Основной ее акцент сместился на рассмотрение методов конструирования системы — в частности, вопросов

параллельной инженерии. Они проиллюстрированы на примере разработки космических аппаратов CryoSat (ESA).

И, наконец, авторы хотели бы поблагодарить множество людей, чьи усилия помогли осуществить это издание — без них книга попросту не увидела бы свет. Мы выражаем огромную признательность команде издательства Wiley, в особенности Никки Скиннер и Джилл Уайтли, оказавшим неоценимую поддержку в подготовке рукописи. Книга была уже сдана в производство, когда всех нас потрясла и опечалила внезапная смерть Никки Скиннер.

Я сожалею, что наше общение с Никки ограничивалось электронной перепиской (как это часто бывает в наши дни). Хотя у нас не было возможности встретиться лично, я тем не менее чувствую, что знал Никки хорошо. Я благодарен ей за постоянную помощь, и это издание совершенно закономерно посвящено ее памяти.

Грэм Суайнерд

Саутгемптон, март 2011 года

ПРЕДИСЛОВИЕ К ТРЕТЬЕМУ ИЗДАНИЮ

Грэм Суайнерд, мой друг и коллега, возглавил учебный курс по космическим технологиям после моего ухода на пенсию в 1989 году. Можно ли было найти лучшего редактора для нового издания книги «Разработка систем космических аппаратов»? Я уверен, что Грэм еще сильнее укрепит созданную прежними изданиями репутацию книги, и желаю ему успеха в его новой роли. А теперь дело за тобой, Грэм...

Питер Фортескью,
Саутгемптон, июль 2002 года

С выхода предыдущего издания многое изменилось. Сформулированная Дэном Голдином философия космических полетов, выражающаяся словами «быстрее, лучше, дешевле», оказала огромное влияние на деятельность США в этой области. В октябре 1997 года стартовал к Сатурну последний из межпланетных космических аппаратов-тяжеловесов — «Кассини». На место миссий такого рода пришли новые — программы типа NEAR Shoemaker, в ходе которых на орбиту в феврале 1996 года вывели сравнительно небольшой, но мощный космический аппарат, приземлившийся затем на поверхность малого астероида 433 Эрос. Подобные «небольшие миссии» оказывают и будут оказывать огромное влияние на программы исследования других планет.

В то же самое время мы стали свидетелями появления созвездий спутников на низких опорных орбитах — для глобальной связи с использованием мобильных телефонов. Первый из аппаратов проекта «Иридиум» запустили в мае 1997 года. Несмотря на определенные финансовые проблемы, эта программа открыла эпоху широкомасштабного использования созвездий спутников. У подобных распределенных систем есть ряд преимуществ не только в области связи и навигации, но и в сфере наблюдения за Землей и ее изучения. Заметна также тенденция к использованию групп небольших, но мощных космических аппаратов для работы, которая ранее осуществлялась одним или двумя крупными спутниками.

Основным движущим фактором развития малых спутников стало снижение расходов. Это и скромные затраты на запуск, и короткий период конструирования, изготовления и испытания, и менее сложные наземные интерфейсы и виды операций, а также испытания новых технологий при незначительном финансовом риске.

С другой стороны, в декабре 1998 года на орбите была произведена сборка первых элементов Международной космической станции (МКС). При реализации всех намеченных планов МКС примерно в 2005 году станет крупнейшей конструкцией (весом около 400 тонн), которая когда-либо выводилась на орбиту Земли, и символом возможности постоянного проживания в космосе.

Перечисленные направления развития космической отрасли существенно повлияли на структуру нового издания книги. Главные изменения состоят

в исключении главы о повторном входе в атмосферу и добавлении новой — о конструкции и сферах применения малых спутников. При этом основной материал удаленной главы был размещен в других разделах. Например, вход в атмосферу теперь рассматривается в главе 7 («Ракеты-носители»), а разделы о маневрировании аппаратов включены в главу 5 («Анализ полета»). Малым спутникам посвящена новая глава 18, написанная Мартином Свитингом и Крейгом Андервудом — снискавшими международное признание специалистами из Surrey Space Centre (Университет Суррея, Великобритания). Огромный опыт Surrey Space Centre позволяет лучше разобраться в вопросах разработки систем космических аппаратов в целом. Современное пособие нельзя считать полным без данной информации.

Несколько глав написано заново — в частности, глава 8 («Конструкции космического аппарата»), глава 11 («Система обеспечения теплового режима космического аппарата»), глава 16 («Инженерные вопросы электромагнитной совместимости космического аппарата») и глава 19 («Проектирование космических аппаратов»), а большая часть остальных существенно изменена. Так, в главе 5 («Анализ полета») добавлено обсуждение конструкции созвездий и полетов малых спутников.

Некоторые из готовивших второе издание уже вышли на пенсию, в списке авторов появились новые имена. Редакторы благодарны всем за внесенный вклад. Мы с прискорбием отмечаем, что в ходе подготовки книги ушли из жизни три автора предыдущего издания: Говард Смит («Телекоммуникации»), Лес Вулискрофт («Вопросы инжиниринга электромагнитной совместимости космических аппаратов») и Мервин Брискоу («Механизмы космического аппарата»). Нам их очень не хватает.

Возможно, читатель обратит внимание на посвящение книги одному из авторов, Мервину Брискоу. Вплоть до кончины в 2001 году он активно занимался переделкой своей главы о механизмах. На протяжении многих лет Мервин помогал нам с проведением курса лекций в Саутгемптоне, и мы в знак признательности посвятили данное издание его памяти. Мы благодарны Гульельмо Альетти, с ходу приступившему к завершению работы над главой Мервина в качестве соавтора. И, наконец, благодарим Питера Фортескью и Джона Старка за их огромную работу над предыдущим изданием и за ценнейшую помощь в подготовке настоящего издания.

Грэм Суайнерд
Саутгемптон, июль 2002 года

ПРЕДИСЛОВИЕ КО ВТОРОМУ ИЗДАНИЮ

Данное издание появилось после того, как нам позвонили с предложением, которого мы, как редакторы книги, ждали не без страха: «Не думаете ли вы о выпуске второго издания?» После долгих размышлений мы согласились.

Это не только дало нашим авторам возможность обновить данные — ведь технология постоянно развивается, и пять лет — огромный срок! Мы также смогли исправить некоторые ошибки первого издания (вероятно, добавив вместо них новые), откликнуться на предложения читателей относительно содержания и еще раз подумать над различными вопросами и концепциями. В результате в книге появились две новые главы.

Первая из них посвящена механизмам — важному оборудованию любого космического аппарата. Механизмы входят в системы, описанные в других главах. Однако с учетом множества уникальных требований мы решили посвятить им отдельную главу. В частности, она освещает вопросы, связанные с движением одних механических частей относительно других. Конструкторы решают множество непростых задач, касающихся долголетия работы, предотвращения конструктивных нарушений и недопущения отказов. Глава 16 рассказывает, каким образом они справляются с этими проблемами.

Тема второй новой главы — разработка систем. Английское название книги может пониматься двояко: «Разработка космических аппаратов как систем» или «Разработка отдельных систем космического аппарата». Книга привлекла многих заинтересованных читателей, однако те, кто хотел узнать больше о конструкции отдельных систем, были несколько разочарованы. Поэтому, когда встал вопрос о переиздании, мы решили добавить новую главу (главу 19), посвященную разработке систем космических аппаратов. Мы надеемся, что она позволит объединить кусочки головоломки, раскиданные по другим разделам, и покажет, каким образом они, взятые в совокупности, создадут гармоничное и жизнеспособное целое — космический аппарат, полностью соответствующий поставленным целям.

С момента выхода первого издания некоторые участники проекта сменили работу, кто-то ушел на пенсию. Список авторов пополнился новыми именами. Мы, редакторы, благодарны всем авторам — и новым, и старым — и надеемся, что это издание позволит еще лучше реализовать идею, с которой начиналась работа по созданию книги.

ПРЕДИСЛОВИЕ К ПЕРВОМУ ИЗДАНИЮ

Эта книга создана на основе учебного курса, который читался в Университете Саутгемптона. Появился он в 1974 году, имел продолжительность две недели и был рассчитан на недавних выпускников университетов, которые хотели стать инженерами-проектировщиками космических аппаратов. Этот курс сохранился и по сей день и даже расширился. Так, теперь у него есть недельная версия, ориентированная на опытных инженеров, уже ставших специалистами в своих областях.

В ходе занятий участники разбиваются на конкурирующие команды, разрабатывающие конструкции космических аппаратов. На протяжении многих лет цели миссий связаны с различными областями: наукой, астрономией, связью и наблюдениями за Землей. У нас образовался своеобразный музей моделей, включающий как чертежи, так и презентации команд, посвященные функционированию космических аппаратов, спецификациям подсистем и ограничениям, связанных с запуском. Модели отражают, скорее, возможные направления развития, а не реальные конструкторские решения. Проекты разрабатываются на системном уровне, а их изучение позволило нам определить степень детализации для этой книги.

Цель книги — дать широкую картину, необходимую для системных инженеров, при этом делая акцент не на содержании полезной нагрузки аппарата, а на конструкции. В распоряжении любого опытного специалиста есть профессиональные руководства, содержащие детальную, глубокую информацию о множестве подсистем. Маловероятно, что из этой книги он почерпнет много новых сведений о своем предмете. Однако он узнает что-то новое о смежных дисциплинах и, как мы надеемся, поймет, на какие компромиссы может пойти для оптимизации работы своей и других подсистем.

В главах 2 и 5 вы найдете общие сведения о работе космических аппаратов, особенно спутников. Они функционируют во враждебной среде. Основные ее свойства охарактеризованы в главе 2. Главы 3 и 4 описывают динамику объектов, находящихся в космическом пространстве, то есть в среде, где аппараты вынуждены реагировать на множество сил и импульсов (которые считаются неважными в земных условиях). На самом деле эти силы действуют и на Земле, однако здесь их влияние компенсируется другими, более масштабными и присущими нашей планете.

Глава 5 рассказывает о связи движения космического аппарата с Землей, а не с инерционной системой координат в рамках небесной механики.

Главы 6–15 описывают основные подсистемы. Главы 7 и 8 посвящены запуску и возврату космических аппаратов на Землю. В главах 6, 9–12 и 14 рассматриваются основные подсистемы, расположенные на борту, в том числе бортовые элементы телеметрии и линии управления (глава 14) с системами наземного контроля (глава 15). Работа линии управления — в главе 13, причем там можно найти как основы предмета, так и примеры конкретного применения определенных типов космических аппаратов. Данный комментарий относится

и к телеметрии, и к линиям управления, и к коммуникационной полезной нагрузке.

Глава 16 рассказывает об электромагнитной совместимости. Любой системный инженер должен уделить этому внимание, чтобы обеспечить гармоничную работу различных подсистем в рамках единого комплекса. Качество продукта — жизненно важный вопрос для проектировщиков космических аппаратов. Плоды их работы должны функционировать во враждебной среде при выведении на орбиту, а затем еще многие годы в космосе, без какой-либо возможности текущего ремонта.

Мы как редакторы благодарим авторов, внесших свой вклад в написание книги. Большинство из них выступало в Университете Саутгемптона в качестве преподавателей. Наша задача состояла в обработке обширного лекционного материала, которым коллеги столь щедро поделились с нами. Мы также признательны им за огромное терпение. Нам казалось, что в превращении лекций в текст книги нет ничего сложного, что это не займет много времени. Вы даже не представляете, как сильно мы ошибались!

Мы хотим также сказать спасибо нашим коллегам Грэму Суайнерду и Адриану Тэтнеллу, прочитавшим рукопись и давшим ценные советы. И, наконец, выражаем благодарность Салли Малфорд, которая с присущим ей терпением и чувством юмора превратила не самую удобную для работы рукопись в готовый текст.

ОТ ПАРТНЕРА РОССИЙСКОГО ИЗДАНИЯ

Уважаемые читатели!

Постоянно возрастающие требования к специалистам, осуществляющим космическую деятельность, рост числа аварий, вызванных человеческим фактором, делают вопрос повышения профессионального образования в российской ракетно-космической отрасли все более актуальным.

Страховой центр «СПУТНИК», специализирующийся на страховании космических рисков, считает для себя необходимым поддерживать выпуск литературы по актуальным вопросам космонавтики. Перевод на русский язык и издание мирового бестселлера специализированной космической литературы — книги «Разработка систем космических аппаратов» — реальный вклад компании «СПУТНИК» в это общее дело.

Впервые «Разработка систем космических аппаратов» была опубликована в 2003 году. В основу книги легли материалы образовательной программы Университета Саутгемптона (Великобритания), преподаватели которого постоянно читают лекции сотрудникам Европейского космического агентства, Европейского центра космических исследований и технологий. В течение 10 лет издание дополнялось новыми сведениями и исследованиями зарубежных специалистов, некоторые из них являются лауреатами премии Luigi Napolitano Literature Award, присуждаемой ученым за вклад в космические исследования.

Экземпляр, который вы держите в руках, подготовлен на основе последнего четвертого англоязычного издания, включающего разделы, посвященные актуальным тенденциям в космической области, а также отдельную главу по сбору информации о качестве космических аппаратов и его контролю.

Уверен, книга будет интересна как работающим в отрасли специалистам, так и тем, кто только собирается присоединиться к профессиональному сообществу. Более того, она может стать достойной основой для внутриотраслевого обсуждения системных и технологических вопросов. «СПУТНИК» планирует продолжить опыт содействия изданию и распространению современных работ в области космонавтики в партнерстве с ведущими издательствами.



*С уважением,
президент
Страхового центра «СПУТНИК»
Вячеслав Шабалин*

ГЛАВА 1. ВВЕДЕНИЕ

Джон П.У. Старк (1), Грэм Дж. Суайнерд и Адриан Р.Л. Тэтнелл (2)

^[1] *Школа инженерных наук и материаловедения, Колледж королевы Марии, Лондонский университет*

^[2] *Отделение аэронавтики и астронавтики, факультет инженерных наук и окружающей среды, Университет Саутгемптона*

Человек начал успешно управлять космическими аппаратами лишь с 1957 года, когда на орбиту Земли вышел советский Спутник-1. На момент написания этой книги (2010 год) Космическая эра человечества насчитывает немногим более полувека. За это время технологии сделали огромный шаг вперед, и даже высадка человека на Луну (программа «Аполлон») кажется уже далекой историей.

Менее чем за пять минувших десятилетий беспилотные космические корабли совершили экспедиции к основным небесным телам Солнечной системы, за исключением карликовой планеты Плутон. Но вскоре, в 2015 году, корабль «Новые горизонты»¹ должен пролететь и через небесную систему Плутона-Харона. Осуществлялись посадки на Луну и Венеру, армады орбитальных кораблей, спускаемых аппаратов и марсоходов готовят долгожданную экспедицию человека на Красную планету. В 1995 году орбитальный аппарат «Галилео»² выпустил зонд, который достиг газообразной поверхности Юпитера. Успешной была и экспедиция «Кассини-Гюйгенс»³ — в 2004 году космический аппарат вышел на орбиту Сатурна, а в 2005 году созданный европейскими учеными зонд «Гюйгенс» совершил идеальную посадку на поверхность Титана.

Ученые обратили свои взоры и на малые небесные тела Солнечной системы. В феврале 2001 года космический аппарат Near Earth Asteroid Rendezvous (NEAR) совершил посадку на астероид Эрос. В 2005 году японский космический корабль «Хаябуса» предпринял попытку добыть образцы грунта с астероида Итокава. Хотя эта операция прошла не совсем успешно, космический аппарат находится на пути к Земле, и ожидается, что в его капсуле набран определенный объем астероидного вещества. В 2014 году предполагается посадка спускаемого аппарата на комету — смелый европейский проект «Розетта»⁴. Сейчас мы лучше, чем прежде, понимаем опасность астероидов и комет, проходящих неподалеку от Земли, — и это стимулирует поиск эффективных способов, позволяющих предотвратить их столкновение с нашей планетой.

¹ New Horizons (англ.).

² Galileo (англ.).

³ Cassini-Huygens (англ.).

⁴ Rosetta (англ.).

После шести экспедиций на Луну (1969–1972) полеты человека в космос ограничивались орбитой Земли. Основное внимание уделяется созданию и использованию Международной космической станции. В реализацию долгосрочной программы вовлечены США, страны Европы, Россия и Япония. МКС — значительный шаг вперед в области космических технологий и политики, позволивший нам научиться жить и работать в космосе. Этот опыт крайне необходим в будущем, когда корабли с экипажами начнут изучать Солнечную систему. Основной «рабочей лошадкой» программы были шаттлы, которые использовались в США для полетов человека на околоземную орбиту почти три десятилетия. Но в 2011 году программу «космических челноков» свернули. Это значительнейшее событие в жизни NASA привело к серьезному переосмыслению американских планов полета человека в космос. В частности, предлагается программа «Созвездие»¹ с менее сложными ракетами типа «Арес-1». Цель ее — создание новой инфраструктуры, которая позволит отправлять астронавтов США на Луну, а затем и на Марс. Однако отказ от программы транспортной космической системы «Шаттл» совпал с глобальным финансовым кризисом, и не исключено, что он отразится и на программе «Созвездие». Подобная переоценка действий Соединенными Штатами Америки может значительно активизировать коммерциализацию космической инфраструктуры.

При этом практически нет сомнений, что развитие беспилотных космических кораблей продолжится прежними темпами. Сейчас уже многие страны могут вывести свои летательные аппараты на околоземную орбиту. Спутники стали неотъемлемой частью инфраструктуры технологического общества. Есть все основания считать, что в будущем значение спутников возрастет.

До XX века размышления о путешествиях в космос были уделом фантастов. Большинство писателей не имели представления о движении космических кораблей, поэтому фантазировали о «кораблях легче воздуха» [1, 2]. Однако в самом начале XX века русский учитель К.Э. Циолковский заложил краеугольный камень в развитие ракетной техники, открыв миру природу реактивного движения. В 1903 году он опубликовал *статью*, в которой впервые описано то, что мы теперь называем формулой Циолковского (уравнение (3.20)). Из-за небольшого тиража статья была почти неизвестна на Западе — вплоть до опубликования в 1923 году работы Германа Оберта.

Научный анализ позволил сформулировать общее понимание требований к реактивному движению. Тем не менее оно не сопровождалось технологическими решениями (технологии возникли позднее — в работах Роберта Годдарда в США и Вернера фон Брауна в Германии). Научно-техническим достижением немцев в этой области стали ракеты «Фау-2», примененные фашистской Германией в конце Второй мировой войны. Хотя ракета и не могла выйти космическую орбиту, по сути это была первая надежная реактивная система, способная переместить боеголовку весом примерно 1000 кг на расстояние свыше 300 км. Нарботки немецких ученых во многом использовались при создании советского Спутника-1 (4 октября 1957 года), вслед за которым (31 января 1958 года) на орбиту Земли вышел первый американский спутник «Эксплорер-1»².

¹ Constellation Programme (англ.).

² Explorer 1 (англ.).

Космические технологии активно развивались в течение пяти десятилетий. Дела не всегда шли гладко: американская космическая программа получила ряд чувствительных ударов — катастрофы кораблей «Челленджер»¹ (1986) и «Колумбия»² (2003). Тем не менее во многих областях удалось достичь существенного прорыва. Это и технологии преобразования энергии (в особенности солнечные батареи и топливные элементы), и применение при строительстве космических объектов технологий трубопроводов — из индустрии нефтедобычи и переработки, и многое другое. Наиболее заметными стали нововведения в сфере компьютеризации и программного обеспечения. Хотя их развитие далеко не всегда связано с космосом, новые возможности активно принимались на вооружение космической отрасли и помогли совершить настоящую революцию с точки зрения гибкости решений. В некоторых случаях именно благодаря им потенциальные неудачи в ходе полетов превращались в значимый успех.

Создание космических кораблей стало вызовом человеческой изобретательности и разуму. Изучив динамику движения космического корабля, мы получили более полное представление о таких фундаментальных явлениях, как, например, вращательное движение тела. Человек преуспел в проектировании аппаратов, способных противостоять враждебной среде космоса, и нашел для этого множество решений.

1.1. ФУНКЦИИ И МИССИИ

Существует множество различных функций и миссий космического корабля. Некоторые из них приносят прямую практическую пользу, возьмем спутники связи или спутники, предназначенные для навигации и прогнозирования погоды. Другие — помогают в поиске полезных ископаемых на Земле, ведут мониторинг сельскохозяйственных площадей, следят за промышленными загрязнениями. Наблюдение с околоземной орбиты используется для оценки и определения процессов потепления на планете. Некоторые спутники служат целям науки сегодняшнего дня и человечества в будущем, позволяя углубить наши знания о планете, Солнечной системе и Вселенной.

Но мирным функциям почти всегда сопутствуют военные. Спутники связи и метеорологические спутники поставляют «сверхдержавам» информацию обо всех передвижениях на земле и в воздухе. Навигационные спутники Global Positioning System (GPS) позволяют пехотинцу, моряку или пилоту истребителя определять местонахождение с точностью до одного метра. Практически во всех недавних военных конфликтах так или иначе использовались космические технологии.

В табл. 1.1 приведен список миссий и функций с разделением по категориям — в зависимости от возможных типов траектории. Классификацию спутников можно проводить несколькими способами — по высоте, эксцентриситету или наклону орбиты. Важно отметить, что выбор конкретной орбиты оказывает огромное влияние на конструкцию аппарата, как показано в следующих абзацах.

¹ Challenger (англ.).

² Columbia (англ.).

Таблица 1.1. Типы миссий и функций

Миссия	Тип траектории
Связь	Геостационарные — для низких широт, «Молния» и «Тундра» — для высоких широт (в основном российские), группы полярных спутников на низкой опорной орбите — для глобального покрытия
Земные ресурсы	Полярные LEO-спутники для глобального покрытия
Погода	Полярные LEO-спутники или геостационарные
Навигация	Наклоненные MEO для глобального покрытия
Астрономия	LEO, NEO, GEO и «орбиты» вокруг точек Лагранжа
Космическая среда	Различные, в том числе NEO
Военные цели	Полярные LEO для глобального покрытия
Космические станции	LEO
Демонстрация технологий	Различные

П р и м е ч а н и е . GEO — геостационарная орбита Земли (Geostationary Earth Orbit); NEO — высокая эллиптическая орбита (Highly Elliptical Orbit); LEO — низкая опорная орбита (Low Earth Orbit); MEO — средняя околоземная орбита (Medium height Earth Orbit).

На геостационарных орбитах спутник располагается неподвижно относительно определенного участка Земли. Для выхода на такую орбиту требуется сильный импульс тяги, поэтому «сухая масса» (масса за вычетом топлива) составляет незначительную часть общей стартовой массы аппарата. При сохранении нынешней стоимости доставки одного килограмма груза на геостационарную орбиту (около 30 000 долларов) необходима оптимизация конструкции, позволяющая достичь минимальной массы. Это, в свою очередь, приводит к появлению множества других устройств, имеющих узкое целевое назначение.

При связи с Землей получаемый сигнал на порядок, а то и несколько слабее передаваемого — из-за большого расстояния. Однако космический аппарат постоянно находится в зоне видимости наземной станции управления, ее сотрудники непрерывно наблюдают за его состоянием. Поэтому в процессе разработки меньше внимания уделяется степени автономии и созданию сложной системы обработки и хранения данных.

Полеты на низкую опорную орбиту имеют совершенно иные характеристики. Связь с наземной станцией прерывиста. Поэтому в начале 1980-х годов разработали TDRSS¹ — новый тип аппаратов спутниковой связи и управления, находящихся на геостационарной орбите и обеспечивающих постоянную связь между аппаратами на низкой опорной орбите и наземным центром. Это очень важный шаг вперед, так как шаттлам, находящимся на низкой опорной орбите, необходима непрерывная связь с Землей. В целом близость к Земле на низкой опорной орбите делает их привлекательными с точки зрения мобильной коммуникации, так как по сравнению с геостационарными спутниками задержка сигнала меньше.

При сравнении аппаратов, работающих на низкой опорной и на геостационарной орбитах, видны существенные различия в подсистемах питания. Спутники на низкой опорной орбите в основном пребывают в тени Земли,

¹ Tracking and Data Relay Satellite System (англ.).

следовательно, необходимо увеличивать размер солнечных батарей. Аппараты на геостационарной орбите, наоборот, находятся больше времени на освещенной стороне. Однако здесь возникают специфические требования по стойкости батареи к глубокому разряду. Некоторые различия между системами питания отчасти связаны с изменением угла Солнца относительно орбитальной плоскости в течение года. Проблему можно решить при солнечно-синхронной орбите (см. главу 5, раздел 5.4), когда сохраняется почти постоянный угол Солнца. Чаще это делают не для упрощения системы передач, а для того, чтобы инструменты изучения поверхности Земли проводили измерения каждый день в одно и то же местное время.

В дальнейшем вы увидите, что почти все изменения параметров полета имеют огромное влияние на спецификации подсистем — как непосредственно составляющих космический аппарат, так и связанных с его поддержкой.

1.2. КОСМИЧЕСКИЙ АППАРАТ КАК СИСТЕМА

Книга посвящена рассказу о системах космических аппаратов, значительно различающихся по типам и формам. При описании удобно делить их на функциональные элементы или подсистемы. Не менее важно понять, что спутник сам по себе является лишь элементом более крупной системы. Помимо него, должна существовать поддерживающая система наземного управления (рис. 1.1). Она посылает команды и принимает информацию о состоянии аппарата, данные с устройств, составляющих его модуль полезной нагрузки. Необходимы и средства выведения аппарата на целевую орбиту. Каждый из элементов общей системы должен взаимодействовать с другими, а разработчик формулирует некий оптимум, при котором цели полета достигаются наиболее эффективным образом. К примеру, вполне нормальной считается ситуация, когда геостационарный спутник выходит на свою окончательную орбиту с помощью комбинации ракеты-носителя и двигательной установки самого спутника.

Речь идет о целостном процессе инженерной разработки систем, который будет детально рассмотрен в последней главе книги. Рис. 1.1 иллюстрирует разбивку элементов, необходимых для формирования миссии спутника. Каждый из элементов выполняет определенные функции, связанные с конкретными требованиями. При разработке систем мы анализируем, как их удовлетворить наилучшим образом.

Словарь Chambers Science and Technology Dictionary дает очень удачное определение термина «разработка систем»:

«Логический процесс, который превращает набор требований, возникающих из целей конкретного полета, в полное описание системы, способной достичь цели оптимальным образом. Этот процесс позволяет надлежащим образом рассмотреть все аспекты работы и интегрировать их в единое целое».

«Система» в данном случае может состоять из всех элементов проекта (как в космосе, так и на земле), в том числе интерфейсов между основными элементами, как показано на рис. 1.1. Помимо этого, системный подход в более ограниченном виде может применяться для отдельных наборов или инструментов в космическом сегменте. Например, инструментов в составе модуля полезной нагрузки (разбивка системы будет включать в себя элементы антенн, оптику или

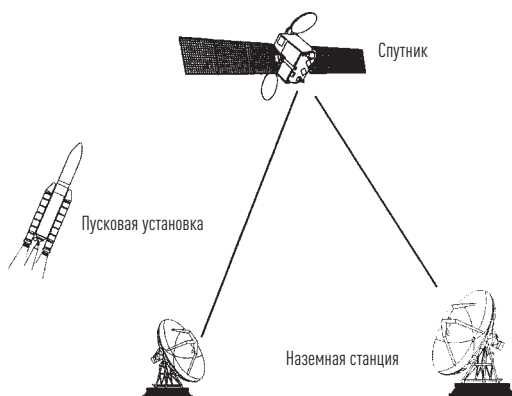


Рис. 1.1. Общая система космических и наземных сегментов

детекторы, а также связанные с инструментами механическую и электрическую подсистему).

Цели полета определяются потребителем или пользователем. Они должны быть четкими и в то же время достаточно общими, чтобы не меняться в процессе конструкторских работ. Это фундаментальные задачи, выполняющиеся постепенно, по мере конструирования космического аппарата.

К примеру, цель полета — обеспечение безопасного, надежного ориентирования в трехмерном пространстве и определение скорости движения для наземных и воздушных военных пользователей. Здесь используется *Global Positioning System (GPS)*.

Чтобы понять, каков диапазон применяемых методов и как много выдвигается требований, можно изучить концепции обеспечения глобальной мобильной коммуникационной системы. Это расширение функций уже имеющейся системы космических аппаратов Inmarsat (Инмарсат) за счет использования орбит с большим эксцентриситетом и орбит «Тундры» (определение которых можно найти в главе 5), а также множество программ, основанных на сети спутников на низкой опорной орбите, таких как Globalstar (Глобалстар) или Iridium (Иридиум).

Это пример основополагающего принципа разработки систем — для достижения цели никогда не бывает одного решения. В каждом случае разработчики имеют широкий набор (некоторые лучше, некоторые хуже), базирующийся на объективных параметрах, таких как расходы, масса или какой-либо из показателей производительности. Главная задача системотехника заключается в формировании единого решения на основе множества неравнозначных оценок.

Прежде всего системотехник формулирует требования к полету на базе общих целей. В процессе последующей конструкторской работы определяются производные требования к системе и подсистемам (формирование иерархии требований показано на рис. 1.2). Подробному рассказу об этой иерархии посвящена глава 20, в которой проиллюстрированы особенности ряда космических аппаратов. На данный момент имеет смысл обратить внимание на двунаправленные стрелки на рис. 1.2, подчеркивающие наличие постоянной обратной связи и итеративную природу разработки систем.



Рис. 1.2. Цели и требования, связанные с полетом космического аппарата

Обратимся к системе космического аппарата как таковой. Для удобства разделим ее на два принципиально отличных элемента — модуль полезной нагрузки и шину (или модуль служебных систем). Определяющим фактором каждого полета является полезная нагрузка. Для нормального функционирования модуля полезной нагрузки требуется ряд ресурсов, предоставляемых модулем служебных систем. Основные функциональные требования таковы.

1. Модуль полезной нагрузки должен быть сориентирован в правильном направлении.
2. Полезная нагрузка должна быть операбельной.
3. Данные, поступающие от модуля полезной нагрузки, должны быть донесены до наземных структур.
4. Необходимо поддерживать желательную для целей полета орбиту.
5. Элементы модуля полезной нагрузки должны находиться вместе, причем на платформе, на которой они были смонтированы.
6. Элементы полезной нагрузки должны надежно работать в течение определенного периода.
7. Для реализации вышеуказанных функций необходимо иметь источник энергии.

Эти требования ведут к дальнейшей разбивке на подсистемы (рис. 1.3). В каждом пункте указан номер, связанный с описанной выше функцией.

Структура этой книги в целом соответствует функциональной разбивке, приведенной на рис. 1.3. Отдельным подсистемам посвящены специальные главы. В главе 8 рассматриваются структурные подсистемы, а в главе 15 — конструкции отдельных механизмов. Подсистема, включающая в себя различные

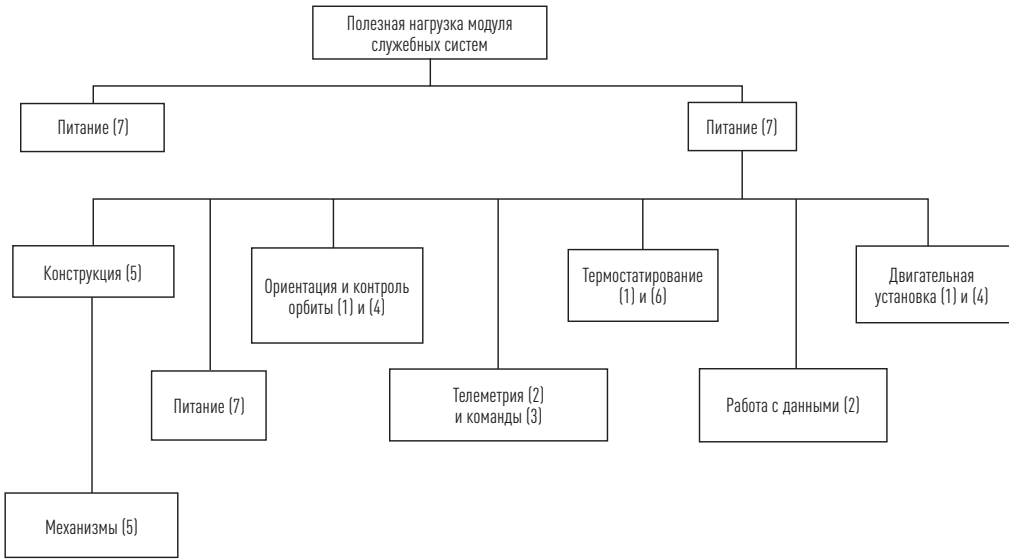


Рис. 1.3. Подсистемы космического аппарата

способы электрического питания на космическом аппарате, описана в главе 10. Основные элементы подсистемы контроля — в главе 9, а общие принципы, определяющие движение свободного тела (например, спутника), — в главе 3. Подсистемы телеметрии и команд — в рамках изучения работы с данными на борту (OBДН¹) — в главе 13. основополагающие принципы и практика коммуникации, связанной с космическим аппаратом, — в главе 12. В главе 11 рассказывается о подсистеме термостатирования. Вопросы реактивного движения, связанные с бортовыми системами, описаны в главе 6, а средств выведения — в главе 7.

Конструкция каждой подсистемы влияет (в том числе с точки зрения ресурсов) на остальные. При проектировании систем космического корабля важно понять специфику полета и отдельных элементов конструкции. Они могут оказать решающее влияние на выбор типа спутника. В некоторых случаях — на основные свойства оборудования космического аппарата. Различия в требованиях к полету и необходимость снижения массы привели к возникновению множества вариантов конструкций. Однако в настоящее время отрасль, создающая космические аппараты, движется в сторону стандартизации — специальные платформы используются как ресурс для разных целей (например, платформа SPOT, платформа Eurostar, Mars/Venus Express и т.д. — см. главу 20).

Конструкция, избранная для конкретного полета, определяется не только характером полезной нагрузки (хотя он и оказывает значительное влияние). На инженерную разработку космических аппаратов чрезвычайно влияют и коммерческие, и политические соображения. Здесь все зависит от опыта каждой компании в рамках определенного поля. Например, компания Hughes преуспевает в создании спутников, стабилизируемых вращением (таких, как серия космических аппаратов Intelsat). Разработка систем космического аппарата — не просто наука, но и в определенной степени искусство.

¹ On-board data handling.

Все это заставляет нас подумать еще об одном важном свойстве конструкции космических аппаратов — надежности. В наземных системах надежность не настолько критична для выживания. Даже в случае отказа какого-либо компонента всегда есть возможность вызвать команду ремонтников. При работе в космосе такой роскоши нет. И хотя программа «Шаттл» позволяла осуществлять техническое обслуживание ограниченного набора спутников на орбите, вариант был очень дорогостоящим. Другими словами, система должна быть устойчивой к отказам. Иначе она перестает быть операбельной, в результате чего полет заканчивается.

Высокую надежность обеспечивают два основных метода. Первый — использование хорошо зарекомендовавших себя конструкций. Это справедливо как для системы в целом, так и для отдельных ее компонентов. Требования к соответствию условиям среды (глава 2) заставляют нас использовать устаревшие типы компонентов (в особенности электронных). А это, в свою очередь, приводит к росту потребляемой мощности (она куда больше, чем в новейших наземных технологиях). На системном уровне опробованные и протестированные решения минимизируют риски, снижают общие расходы и обеспечивают высокую степень надежности.

Второй метод связан с ограничением допустимых значений некоторых параметров (глава 19). К примеру, за счет снижения мощности множества электронных компонентов можно увеличить ожидаемую продолжительность функционирования, а это приводит к общему повышению массы.

В результате проектирование космических аппаратов высокой степени надежности ведется довольно консервативным образом: «Лучшие решения — это решения, хорошо показавшие себя в прошлом». Во многом именно по этой причине технология, используемая при создании большого числа спутников, редко бывает новой или передовой. Команда инженеров приспособливает уже имеющуюся конструкцию под потребности различных полетов — и поэтому разработку систем можно считать искусством ничуть не в меньшей степени, чем наукой.

При выборе подсистем космического аппарата разработчик должен хорошо представлять себе, как они действуют, какие сложные взаимоотношения между ними существуют и каким образом они соответствуют системе более широкого уровня. Кроме того, необходимо найти компромисс между преимуществами в одной области и недостатками в другой, а также достичь баланса, при котором конечный результат будет представлять собой единое и гармоничное целое. И хотя у каждой подсистемы свои критерии производительности, ее производительность в общем должна соответствовать параметрам всей системы.

1.3. БУДУЩЕЕ

Входя во вторую половину столетия Космической Эры, мы вплотную приблизились к новым границам. Мы обеспечили себе доступ в космос и используем его (в основном с помощью спутников) для разных целей. Однако пока что — довольно ограниченно. В первую очередь из-за высокой стоимости запуска, и для выхода к новым границам надо преодолеть это препятствие. Требуется космическая инфраструктура, включающая основные элементы коммуникации, а так-

же безопасные и надежные средства транспортировки, позволяющие человеку постоянно присутствовать в космосе. Изначально — на космических станциях, а затем — на Луне и Марсе. В течение ближайших 40 лет исследование космоса должно быть адаптировано к изменениям мирового политического климата. В прежние времена, в эпоху «Аполлона», финансирование космических программ стимулировалось победой в «космической гонке» и связанной с ней демонстрацией превосходства той или иной идеологии.

Очевидно, что для развития новой инфраструктуры необходима система космической транспортировки. Первый этап — отрыв от Земли — требует создания и совершенствования новых средств выведения, обеспечивающих многократное применение и имеющих эксплуатационные характеристики, сходные с авиационными. Для этого разработчикам ракет-носителей и специалистам по материалам надо решить несколько непростых задач. Прорыв в этих областях даст невероятно интересные результаты. Снизив затраты для выхода на орбиту, мы выйдем и на новые рубежи науки, использования космоса, дальнейшего изучения Вселенной и космического туризма.

В начале XXI века завершит свою работу и МКС. Эта программа была неординарной и крайне дорогостоящей. На смену ей придут космические станции будущего, которые послужат своеобразными форпостами для новых проектов. Очевидно, на них рано или поздно начнутся сборка и обслуживание космических аппаратов. А это значит, что им не придется противостоять тяжелым условиям запуска с Земли и последующие этапы их путешествия станут сравнительно свободными от лишних нагрузок. Огромный потенциал есть и у производства в условиях космоса, причем речь не только о нетрадиционных материалах, но также и о легких конструкционных материалах, экструдированных в условиях нулевой гравитации для использования в этих же условиях. Уже имеются некоторые разработки в коммуникационной инфраструктуре. Скоро возникнут орбитальные «жилые единицы» для науки и космического туризма. В этом деле большую помощь окажут данные о способности человека жить в космосе. Это и потребность в энергообеспечении, и система снабжения, и масса других вопросов.

Мы стоим на перекрестке. Необходимо принять решение, как развивать присутствие человека в космосе. О том, как все должно осуществляться и какова роль человека в космосе, ведутся споры в течение последних 50 лет. Также обсуждаются источники финансирования проектов — государственные средства или частный капитал? Сторонники прежнего курса вновь обретают былую силу: финансирование космических программ проводится во многом за счет налогоплательщиков. Этот вопрос занимал особое место в дискуссии 2009–2010 годов, инициированной администрацией президента Обамы и комиссией Августина¹, в результате которой, в частности, закрыли программу «Созвездие».

Перед нами доселе невиданная картина. До недавнего времени о развитии космического туризма размышляли только мечтатели и любители научной фантастики. Сейчас ситуация меняется — не в последнюю очередь благодаря премии Ansari X (октябрь 2004 года), которую получил космический корабль SpaceShipOne, созданный компанией Scaled Composites. Состоявшийся

¹ Созданная в 2009 году специальная комиссия для изучения состояния дел в области пилотируемых космических полетов, проводимых NASA. Официальное название — The Review of United States Human Space Flight Plans Committee.