

***В. И. КУРЕНКОВ,
В. А. КАПИТОНОВ***

**МЕТОДЫ РАСЧЕТА
И ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ
РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКИХ
КОМПЛЕКСОВ**

2007



САМАРА

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА»

В. И. КУРЕНКОВ, В. А. КАПИТОНОВ

МЕТОДЫ РАСЧЕТА И ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия*

САМАРА
Издательство СГАУ
2007

УДК 629.78 (075)
ББК 39.62
К 93



**Инновационная образовательная программа
"Развитие центра компетенции и подготовка
специалистов мирового уровня в области аэро-
космических и геоинформационных технологий"**

Рецензенты: начальник сектора надежности ГНП РКЦ «ЦСКБ -
Прогресс» В. И. Крысенко;
канд. техн. наук, доц. А. С. Кучеров

Куренков В. И.
**К 93 МЕТОДЫ РАСЧЕТА И ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ РА-
КЕТНО-КОСМИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ:** учеб. пособие
/В. И. Куренков, В. А. Капитонов – Самара: Изд-во Самар. гос.
аэрокосм. ун-та, 2007. – 320 с. : ил.

ISBN 978-5-7883-0504-2

Рассматривается место и роль надежности в основных тактико-технических характеристиках ракетно-космического комплекса. Излагаются методы расчета надежности сложных технических систем и их элементов. Рассматриваются методические вопросы нормирования надежности ракетно-космических комплексов. Приводятся организационные и технические аспекты решения проблемы обеспечения надежности ракетно-космической техники на различных этапах жизненного цикла изделий.

Учебное пособие предназначено студентам специальностей 160801 «Ракетостроение», 160802 «Космические аппараты и разгонные блоки» и специальности 230301 «Моделирование и исследование операций в организационно-технических системах». Оно также может быть полезно молодым специалистам ракетно-космической отрасли.

Подготовлено на кафедре летательных аппаратов.

УДК 629.78 (075)
ББК 39.62

ISBN 978-5-7883-0504-2

© Куренков В. И., Капитонов В.А., 2007

© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2007

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	7
ВВЕДЕНИЕ	8
1. ИСТОРИЧЕСКИЙ АСПЕКТ НАДЕЖНОСТИ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ	10
1.1. История появления и развития методов количественной оценки надежности технических систем	10
1.2. Надежность ракетной техники	12
1.3. Надежность космической техники	17
1.4. Краткий обзор современной литературы по надежности	19
1.5. Объем изучаемых вопросов	24
2. НАДЕЖНОСТЬ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ	26
2.1. Структура ракетно-космического комплекса	27
2.2. Эффективность системы	32
2.3. Надежность системы	37
2.4. Изменение надежности ракетно-космического комплекса в процессе жизненного цикла	39
3. ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ	45
3.1. Основные технические состояния	45
3.2. Дефекты, повреждения, отказы	46
3.3. Временные понятия	48
3.4. Техническое обслуживание и ремонт	49
3.5. Общетехнические показатели надежности	50
3.6. Термины и определения надежности космических комплексов и ракетно-космических систем	52
3.7. Показатели надежности космических комплексов и ракетно-космических систем	54
4. НЕКОТОРЫЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ МНОЖЕСТВ И ТЕОРИИ ВЕРОЯТНОСТЕЙ	59
4.1. Элементы теории множеств	59
4.2. Мощность и мера множества	63
4.3. Вероятность случайного события	64
4.4. Свойства случайных событий	64
4.5. Независимость и зависимость случайных событий	67
4.6. Условная вероятность	68
4.7. Случайные величины	72
4.8. Биномиальный закон распределения	74
4.9. Распределение Пуассона	76
4.10. Непрерывные случайные величины	79
4.11. Некоторые законы распределения	83
4.12. Математическое ожидание и дисперсия функции случайных величин	88
4.13. Элементы математической статистики	90
4.14. Доверительные интервалы	93
5. МЕТОДЫ РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ	95
5.1. Надежность как вероятность случайного события	96
5.1.1. Доверительные границы надежности	97

5.1.2. Доверительные границы надежности для высоконадежных элементов	100
5.2. Надежность как качество, развернутое во времени	102
5.2.1. Функция надежности	102
5.2.2. Средняя наработка до отказа	105
5.2.3. Интенсивность отказов	106
5.2.4. Экспоненциальный закон надежности	110
5.2.5. Планы испытания на надежность	114
5.3. Надежность как вероятностная прочность	119
5.3.1. Вычисление показателя надежности элемента при произвольных законах распределения нагрузки и прочности	120
5.3.2. Вычисление показателя надежности элементов при нормальных законах распределения нагрузки и прочности	125
5.3.3. Использование метода для оценки надежности отделения створок головного обтекателя	129
5.3.4. Связь между показателем надежности и коэффициентом безопасности	132
5.3.5. Форсированные испытания	137
5.4. Надежность как вероятность невыброса случайного процесса за заданный уровень	140
5.4.1. Некоторые сведения о случайной функции	140
5.4.2. Основные понятия теории надежности В. В. Болотина	142
5.4.3. Выбросы случайного процесса за заданный уровень	143
6. ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ, ИСПОЛЗУЕМЫЕ В ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ	148
6.1. Метод структурных схем надежности	148
6.2. Расчет надежности систем при последовательном соединении элементов	153
6.3. Расчет надежности систем при параллельном соединении элементов	158
6.4. Смешанное соединение элементов	163
6.5. Вероятность безотказной работы системы "не менее m из n "	165
7. ЗАДАЧИ И МЕТОДЫ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ДИНАМИКИ	166
7.1. Основные понятия и постановки задач статистической динамики	166
7.2. Классификация систем в задачах статистической динамики	172
7.3. Методы решения задач статистической динамики	173
7.4. Метод статистической линеаризации	173
7.4.1. Теоретические основы метода статистической линеаризации	173
7.4.2. Использование метода статистической линеаризации в задачах прочности	176
7.4.3. Использование метода статистической линеаризации в задачах надежности безударного разделения	179
7.5. Метод статистических испытаний	183
7.5.1. Суть метода статистических испытаний	183
7.5.2. Моделирование реализаций случайных величин на ЭВМ	185
7.5.3. Программная реализация моделирования реализаций случайных величин с нормальным законом распределения	189

7.5.4. Моделирование реализаций случайных величин с произвольными законами распределения	191
7.5.5. Моделирование дискретных случайных величин	194
7.5.6. Использование метода статистических испытаний в задачах оценки надежности безударного разделения	196
8. ЛОГИКО-ВЕРОЯТНОСТНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ НАДЕЖНОСТИ СТРУКТУРНО-СЛОЖНЫХ СИСТЕМ	203
8.1. Некоторые сведения из математической логики	203
8.2. Правила и законы математической логики	205
8.3. Основные определения функций алгебры логики	207
8.4. Деревья отказов	210
8.5. Методы перехода от логических функций к вероятностным	214
8.5.1. Метод перехода от логических функций к вероятностным на основе формулы вероятности суммы совместных событий	214
8.5.2. Метод перехода от логических функций к вероятностным на основе приведения функции алгебры логики к совершенной дизъюнктивной нормальной форме	216
8.5.3. Алгоритм для автоматизированного приведения функции алгебры логики к совершенной дизъюнктивной нормальной форме	217
8.5.4. Метод статистического моделирования при оценке вероятности состояния логических функций	221
8.6. Метод структурно-логических схем надежности	224
8.7. Анализ чувствительности элементов системы	225
8.8. Применение логико-вероятностных методов для анализа надежности системы с элементами, соединенными по схеме ненагруженного резерва	228
8.9. Использование структурно-логических схем для анализа надежности системы разделения	233
9. НАДЕЖНОСТЬ СИСТЕМ С СЕТЕВОЙ СТРУКТУРОЙ	236
9.1. Представление системы в виде сетевой модели	236
9.2. Некоторые сведения из теории графов	238
9.2.1. Представление сетевой модели в терминах теории графов	238
9.2.2. Аналитические методы определения вероятности парной связности узлов графа	243
9.2.3. Метод вычисления вероятности связности узлов графа с помощью статистического моделирования	248
9.3. Использование методов оценки надежности систем с сетевой структурой в задачах безопасности полетов	250
9.3.1. Сетевая модель выхода из аварийной ситуации и постановка задачи	250
9.3.2. Оценка вероятностных характеристик отдельных работ, производимых при выходе из аварийной ситуации	253
9.3.3. Оценка вероятности парной связности базы и антибазы графа	255
10. НОРМИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ	256
10.1. Техничко-экономическое обоснование значений показателей надежности космического комплекса	257
10.2. Нормирование надежности составных частей ракетно-космического комплекса	262

10.2.1. Нормирование надежности составных частей ракетно-космического комплекса на основе системного подхода	262
10.2.2. Нормирование надежности ракетно-космической техники по изделиям-аналогам	263
10.2.3. Нормирование надежности бортовых систем летательных аппаратов на основе системного подхода	267
10.2.4. Метод нормирования надежности бортовых систем летательного аппарата с помощью весовых коэффициентов	268
10.2.5. Нормирование надежности составных частей бортовых систем летательных аппаратов	274
10.3. Задание требований по надежности проектируемых летательных аппаратов	275
11. ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ НА РАЗЛИЧНЫХ ЭТАПАХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА	280
11.1. Программа обеспечения надежности	281
11.1.1. Анализ требований по надежности	282
11.1.2. Анализ организационно-технических требований	282
11.1.3. Нормирование надежности составных частей летательных аппаратов	283
11.1.4. Анализ видов, последствий и критичности отказов	284
11.1.5. Обоснование различных видов резервирования	291
11.1.6. Перечень расчетно-теоретических работ	294
11.1.7. Перечень экспериментальных работ	296
11.2. Комплексная программа экспериментальной отработки	296
11.2.1. Состав комплексной программы экспериментальной отработки	297
11.2.2. Состав и рекомендуемая последовательность проведения видов испытаний и проверок при автономной отработке приборов, агрегатов, узлов	301
11.2.3. Цели и задачи испытаний, проводимых при наземной отработке космических аппаратов	302
11.3. Программа повышения надежности	305
12. ЛЕТНАЯ ОТРАБОТКА ИЗДЕЛИЙ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ	308
12.1. Методология организации управления и контроля при летных испытаниях	308
12.1.1 Цели и задачи летных испытаний	308
12.1.2. Особенности построения управления космическими аппаратами в нестандартных ситуациях	309
12.1.3. Организация контроля состояния космического аппарата в полете	313
12.2. Планирование объема летных испытаний	327
12.3. Прогнозирование ожидаемого срока активного существования	331
12.4 Оценка надежности ракетно-космического комплекса по результатам летных испытаний	336
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	339
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	340

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящее учебное пособие предназначено студентам специальностей 160802 «Ракетостроение», 160801 «Космические аппараты и разгонные блоки» и специальности 230301 «Моделирование и исследование операций в организационно-технических системах». Оно может быть использовано при изучении теоретического материала по дисциплинам «Методы обеспечения надежности летательных аппаратов» и «Надежность аэрокосмической техники», при выполнении лабораторных работ, курсовых проектов по дисциплинам выше-названных специальностей, а также при дипломном проектировании.

Материал данного пособия может быть использован студентами специальности 160801 и 160802 при изучении курсов «Проектирование летательных аппаратов и комплексов» и «Автоматизация проектирования и конструирования летательных аппаратов».

Учебное пособие предназначено студентам, впервые изучающим вопросы надежности изделий ракетно-космической техники. Может быть полезно молодым специалистам ракетно-космической отрасли. В нем учтены современные требования к методам расчета и обеспечения надежности ракет-носителей и автоматических космических аппаратов.

Хочется выразить глубокую признательность коллегам профессору В. В. Салмину и доценту А. Г. Прохорову за научное и техническое редактирование рукописи учебного пособия, рецензентам - начальнику сектора отдела надежности ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс» В. И. Крысенко и доценту А. С. Кучерову за ценные замечания и рекомендации, которые были учтены при подготовке рукописи к изданию.

Учебное издание

*Куренков Владимир Иванович
Капитонов Валерий Алексеевич*

**МЕТОДЫ РАСЧЕТА И ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ
РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ**

Учебное пособие

Научный редактор В. В. С а л м и н
Технический редактор А. Г. П р о х о р о в
Редакторская обработка Л. Я. Ч е г о д а е в а
Корректорская обработка А. В. Я р о с л а в ц е в а
Доверстка А. А. Н е ч и т а й л о

Подписано в печать 24.09.07 г. Формат 60х84 1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Печ. л. 20,0.

Тираж 90 экз. Заказ . ИП - 36 / 2007

Самарский государственный
аэрокосмический университет.
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

Изд-во Самарского государственного
аэрокосмического университета.
443086 Самара, Московское шоссе, 34.