ДЛЯ ВУЗОВ

В.А. Григорьев, С.П. Кузнецов,
А.С. Гишваров, А.Н. Белоусов,
С.К. Бочкарев, С.А. Ильинский,
В.Т. Шепель

ИСПЫТАНИЯ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Под общей редакцией
д-ра техн. наук, проф. **В.А. Григорьева,**
д-ра техн. наук, проф. **А.С. Гишварова**

Допущено Министерством образования и науки РФ в качестве учебника для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности "Авиационные двигатели и энергетические установки" направления подготовки дипломированных специалистов "Двигатели летательных аппаратов"

МОСКВА
«МАШИНОСТРОЕНИЕ»
2009

УДК 629.7(075.8)
ББК 39.55 я73
И 88

Авторы:
В.А. Григорьев, С.П. Кузнецов, А.С. Гишваров, А.Н. Белоусов, С.К. Бочкарев, С.А. Ильинский, В.Т. Шепель

Рецензенты:
кафедра авиационных двигателей и энергетических установок
Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева;
Академик РАН, д-р техн. наук, проф. В.П. Шорин

И88 **Испытания** авиационных двигателей: Учебник для вузов / под общ. ред. В.А. Григорьева и А.С. Гишварова. — М.: Машиностроение, 2009. — 504 с.: ил.

ISBN 9-785-94275-435-8

Изложены современные способы и методы испытаний авиационных двигателей различных типов. Наряду с традиционными вопросами измерений физических величин, видов испытаний и оборудования их обеспечивающего, рассмотрены методы определения основных технических данных двигателей, специальные испытания, испытания для подтверждения ресурса, проанализированы пути совершенствования экспериментальной базы для испытаний. Особое место занимают вопросы автоматизации научных исследований и испытаний авиационных двигателей.

Для студентов вузов, обучающихся по направлению подготовки «Двигатели летательных аппаратов», а также для специалистов авиадвигательных предприятий.

УДК 629.7(075.8)
ББК 39.55 я73

Издано при финансовой поддержке Федерального агентства по печати и массовым коммуникациям в рамках федеральной целевой программы «Культура России».

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, опубликованных в данной книге, допускаются только с разрешения издательства и со ссылкой на источник информации

ISBN 9-785-94275-435-8

© В.А. Григорьев, С.П. Кузнецов, А.С. Гишваров, А.Н. Белоусов, С.К. Бочкарев, С.А. Ильинский, В.Т. Шепель, 2009
© ООО «Издательство Машиностроение», 2009

СОДЕРЖАНИЕ

Основные условные обозначения 9
Предисловие 15
Введение 17

Глава 1. ИЗМЕРЕНИЯ ПРИ ИСПЫТАНИИ ДВИГАТЕЛЕЙ 25
1.1. Виды и методы измерений 25
1.2. Средства измерений 28
1.3. Особенности измерений при испытаниях ГТД 29
1.4. Измерение давлений 31
1.5. Измерение температур 38
1.6. Измерение расхода топлива 44
1.7. Измерение расхода воздуха 46
1.8. Измерение скорости потока 47
1.9. Измерение напряжений в элементах ГТД 49
1.10. Измерение силы и крутящего момента 50
1.11. Измерение частоты вращения 56
1.12. Измерение вибраций 57
1.13. Измерение эмиссии вредных веществ 57
1.14. Измерение шума 59
1.15. Методы контроля состояния и обнаружения дефектов в ходе испытаний ГТД 60
РЕЗЮМЕ (по главе 1 «Измерения при испытании двигателей») 61
Вопросы 65

Глава 2. ВИДЫ ИСПЫТАНИЙ АВИАЦИОННЫХ ГТД 67
2.1. Создание научно-технического задела и его экспериментальное подтверждение 67
2.2. Испытания опытных ГТД 70
2.3. Испытание серийных ГТД 73
2.4. Техническое и организационное обеспечение испытаний ГТД . . . 80
РЕЗЮМЕ (по главе 2 «Виды испытаний авиационных ГТД») 86
Вопросы 87

Глава 3. ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИ ИСПЫТАНИЯХ ГТД 89
3.1. Основные понятия и определения 89
3.2. Планирование и проведение эксперимента 95
3.2.1. Полный факторный эксперимент 95
3.2.2. Дробный факторный эксперимент 100
3.2.3. Центральное композиционное планирование эксперимента 104
3.3. Применение планирования эксперимента при оптимизации исследуемых процессов 111
3.3.1. Метод крутого восхождения 111
3.3.2. Симплексный метод 115

3.4. Опыт применения планирования эксперимента в авиадвигателестроении 118
3.5. Перспективы развития методов экспериментального исследования ГТД с применением планированного эксперимента 121
РЕЗЮМЕ (по главе 3 «Планирование эксперимента при испытаниях ГТД») 123
Вопросы 124

Глава 4. ИСПЫТАТЕЛЬНЫЕ СТЕНДЫ И ОБОРУДОВАНИЕ 125
4.1. Структура испытательной станции 125
4.2. Испытательные станки и устройства 129
4.3. Основные системы стендов 132
4.4. Летные испытания, летающие лаборатории 136
4.5. Испытательные комплексы 140
РЕЗЮМЕ (по главе 4 «Испытательные стенды и оборудование») . . . 141
Вопросы 142

Глава 5. ВЛИЯНИЕ АТМОСФЕРНЫХ УСЛОВИЙ НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АВИАЦИОННЫХ ГТД 143
5.1. Влияние атмосферной температуры. Изменение рабочего процесса под влиянием $t_н$ 144
5.2. Влияние атмосферного давления 149
5.3. Влияние атмосферной влажности 151
5.4. Влияние законов управления ГТД на их характеристики 153
5.5. Использование формул теории подобия газовых потоков при анализе результатов экспериментов 156
РЕЗЮМЕ (по главе 5 «Влияние атмосферных условий на экспериментальные характеристики авиационных ГТД») . . . 159
Вопросы 160

Глава 6. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСНОВНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ДАННЫХ АВИАЦИОННЫХ ГТД 161
6.1. Основные способы определения НЗП ГТД 162
6.1.1. Способ определения НЗП путем испытаний ГТД на режимах, подобных его работе в стандартных атмосферных условиях (САУ) 163
6.1.2. Способ определения НЗП с помощью специальных коэффициентов пересчета 164
6.1.3. Экспериментальный метод определения нормализующих коэффициентов для ТРДД 165
6.1.4. Особенности определения НЗП ТРДД 167
6.1.5. Особенности испытаний ТРДД 169
6.1.6. Особенности испытания форсажных ТРД и ТРДД . . . 171
6.1.7. Особенности испытания ТРДД с реверсом 173
6.1.8. Особенности испытаний ГТД с отклоняемым вектором прямой тяги 175
6.2. Основные особенности испытаний и определения НЗП ГТД СТ и ТВД 176
6.2.1. Особенности испытаний ГТД СТ и ТВД 176

6.2.2. Особенности экспериментального определения нормальных значений параметров ТВД 179
6.2.3. Методика экспериментального определения косвенным способом нормализующих коэффициентов для параметров ТВД 181
6.3. Экспериментальное определение НЗП ГТД путем поддержания стендовыми системами заданных значений $t_н^*$, $p_н^*$, $M_п$ 183
6.3.1. Высотно-скоростные испытания ГТД в АТ 184
6.3.2. Высотно-скоростные натурные испытания ГТД в термобарокамере (ТБК) 185
6.4. Основные особенности испытания ПВРД 186
РЕЗЮМЕ (по главе 6 «Экспериментальные методы определения основных технических данных авиационных ГТД») 187
Вопросы 189
Глава 7. ИСПЫТАНИЯ АВИАЦИОННЫХ ГТД С ИМИТАЦИЕЙ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ УСЛОВИЙ 190
7.1. Технология испытаний ГТД на высотных стендах 191
7.1.1. Испытания в аэродинамической трубе 195
7.1.2. Испытания в ТБК с присоединенным трубопроводом 198
7.1.3. Испытания с частичной имитацией высотно-скоростных условий 201
7.1.4. Испытания с самолетным воздухозаборником 203
7.1.5. Особенности создания эксплуатационных условий при испытаниях ПВРД и ГПВРД 205
7.2. Системы и оборудование для создания высотных условий на испытательных стендах 207
7.3. Краткая характеристика отечественных высотных стендов 215
РЕЗЮМЕ (по главе 7 «Испытания авиационных ГТД с имитацией эксплуатационных условий») 222
Вопросы 223
Глава 8. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСА И НАДЕЖНОСТИ АВИАЦИОННЫХ ГТД 225
8.1. Эксплуатационные критерии надежности авиационных ГТД . . . 225
8.2. Модели повреждаемости (расходования ресурса) деталей двигателя 230
8.2.1. Длительная прочность 232
8.2.2. Малоцикловая усталость 232
8.2.3. Усталость 233
8.2.4. Модель долговечности в условиях длительного статического и циклического нагружений 234
8.2.5. Модель долговечности при разнородных повреждениях . 235
8.2.6. Износ и контактная усталость 235
8.2.7. Эрозия и газовая коррозия 236
8.3. Ресурсные испытания авиационных ГТД 237
8.3.1. Основные понятия и определения 237
8.3.2. Длительные эксплуатационные испытания ГТД на повышенный ресурс 242

8.3.3. Ускоренные эквивалентно-циклические испытания ГТД 245
8.3.4. Циклические испытания 258
8.3.5. Формирование программ эквивалентно-циклических испытаний основных деталей двигателя 261
8.3.6. Экспериментальная доводка опытных ГТД до 150-часового ресурса 262
8.4. Эксплуатация ГТД по техническому состоянию 264
8.5. Основные стратегии управления ресурсом ГТД 268
8.6. Порядок задания, установления и увеличения ресурса 274
8.6.1. Установление и увеличение назначенных ресурсов основных деталей двигателя 275
8.6.2. Установление назначенного ресурса двигателя 275
8.6.3. Установление и увеличение ресурса новых двигателей при стратегиях управления ресурсом 2 и 3 276
8.6.4. Установление и увеличение ресурса и сроков службы агрегатов и комплектующих изделий 277
8.7. Подходы к подтверждению ресурса основных деталей ГТД 278
8.7.1. Метод «безопасной долговечности» 278
8.7.2. Метод «допустимых повреждений» 281
РЕЗЮМЕ (по главе 8 «Экспериментальные методы определения ресурса и надежности авиационных ГТД») 282
Вопросы 285

Глава 9. СПЕЦИАЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ АВИАЦИОННЫХ ГТД 287
9.1. Испытания ГТД по проверке запасов газодинамической устойчивости 287
9.1.1. Экспериментальное определение запасов устойчивости путем подъема линии рабочих режимов 289
9.1.2. Экспериментальное определение запасов устойчивости путем создания предельных возмущений в потоке на входе в ГТД 291
9.2. Испытания по определению акустических характеристик ГТД . . 294
9.2.1. Характеристики звука и шума 294
9.2.2. Источники авиационного шума 298
9.2.3. Нормирование авиационного шума 300
9.2.4. Экспериментальное исследование шума ГТД 302
9.2.5. Методы снижения шума ГТД 302
9.3. Испытания по определению выбросов загрязняющих веществ авиационными ГТД 306
9.3.1. Закономерности образования загрязняющих веществ в авиационных ГТД 307
9.3.2. Нормирование загрязнения атмосферы авиационными ГТД 308
9.3.3. Измерение содержания загрязняющих веществ в отработавших газах ГТД 311
9.3.4. Уменьшение эмиссии авиационных ГТД при стендовых испытаниях 315
9.4. Испытания авиационных ГТД на обледенение 317

9.5. Испытания ГТД по попаданию посторонних предметов 321
9.6. Испытания ГТД на стойкость против попадания птиц 325
9.7. Испытания ГТД в условиях дождя 331
9.8. Испытания систем защиты 333
РЕЗЮМЕ (по главе 9 «Специальные испытания авиационных ГТД») . . 338
Вопросы 340

Глава 10. ИСПЫТАНИЯ И ДОВОДКА УЗЛОВ И АГРЕГАТОВ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК 343
10.1. Испытания авиационных лопаточных машин 343
10.2. Испытания компрессора (вентилятора) 344
10.3. Испытания основной камеры сгорания 347
10.4. Испытания форсажной камеры 349
10.5. Испытания турбины 349
10.6. Испытания газогенераторов (ГГ) 352
10.7. Испытания систем автоматического управления 354
10.8. Испытания редукторов 355
10.9. Испытания стартеров 356
10.10. Испытания насосов и форсунок 357
10.11. Испытания топливорегулирующей аппаратуры 358
РЕЗЮМЕ (по главе 10 «Испытания и доводка узлов и агрегатов авиационных двигателей и энергетических установок») 360
Вопросы 361

Глава 11. СЕРТИФИКАЦИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ГТД 363
11.1. Система обеспечения и поддержания летной годности 365
11.2. Развитие требований норм летной годности. Законодательная база системы сертификации авиационных двигателей 366
11.3. Основные этапы сертификации авиационных двигателей . . . 369
11.4. Особенности сертификации авиационных двигателей 372
11.5. Сертификация двигателя в составе летательного аппарата 387
РЕЗЮМЕ (по главе 11 «Сертификационные испытания ГТД») 391
Вопросы 392

Глава 12. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ 393
12.1. Приемы препарирования испытываемого ГТД 393
12.2. Основы методики обработки результатов испытаний 395
12.3. Методы и способы уменьшения погрешностей получения экспериментальных данных 395
12.4. Обработка результатов измерений, выполненных в ходе автоматизированных испытаний ГТД 398
РЕЗЮМЕ (по глава 12 «Обработка результатов испытаний») 400
Вопросы 401

Глава 13. ПЕРВИЧНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПРИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ИСПЫТАНИЯХ ГТД 402
13.1. Измерение температуры 402
13.2. Измерение давления 410
13.3. Датчики измерения частоты вращения 415

13.4. Датчики измерения расхода топлива (топливного газа) 417
13.5. Датчики измерения усилия от тяги 423
13.6. Датчики измерения крутящего момента 425
13.7. Датчики измерения зазоров, перемещений 427
13.8. Зонды измерения пульсаций давления газовых сред 430
РЕЗЮМЕ (по главе 13 «Первичные преобразователи при автоматизированных испытаниях ГТД») 432
Вопросы 433

Глава 14. АВТОМАТИЗАЦИЯ ИСПЫТАНИЙ ГТД 435
14.1. Типовые операции при испытаниях ГТД 435
14.1.1. Подготовительно-заключительные операции 436
14.1.2. Испытания по заданной программе 437
14.1.3. Управление режимами работы двигателя 438
14.1.4. Отладка параметров двигателя 439
14.1.5. Обработка результатов испытаний и их анализ 440
14.2. Основы построения АСИ ГТД 441
14.2.1. Основные задачи испытаний, решаемые автоматизированной системой 441
14.2.2. Основные требования к АСИ ГТД 441
14.2.3. Типовая схема АСИ ГТД 442
14.3. Устройства связи с объектом (УСО) 444
14.3.1. Основные функциональные элементы модулей УСО . . 445
14.3.2. Модули УСО 455
14.4. ЭВМ и математическое обеспечение 457
14.5. Система сбора и обработки информации при испытаниях ГТД, автоматизация испытаний 465
РЕЗЮМЕ (по главе 14 «Автоматизация испытаний ГТД») 469
Вопросы 470

Глава 15. ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПРИ АВТОМАТИЗАЦИИ ИСПЫТАНИЙ 471
15.1. Контроль качества измерений 471
15.2. Восстановление характеристик по экспериментальным данным 477
15.3. Идентификация математической модели двигателя 483
15.4. Общая процедура автоматизированной обработки и термогазодинамического анализа результатов испытаний . . . 486
РЕЗЮМЕ (по главе 15 «Особенности обработки экспериментальных данных при автоматизации испытаний») 488
Вопросы 488

Глава 16. ЭКСПЕРИМЕНТ — ОСНОВА ПРОВЕРКИ КАЧЕСТВА ПРОЕКТИРОВАНИЯ И СОЗДАНИЯ ГТД 490

Список литературы 496

Предметный указатель 500