

ДЛЯ ВУЗОВ

В.В. Кулагин, В.С. Кузьмичев

**ТЕОРИЯ, РАСЧЕТ
И ПРОЕКТИРОВАНИЕ
АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ
И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК**

В двух книгах

Книга первая

**ОСНОВЫ ТЕОРИИ ГТД.
РАБОЧИЙ ПРОЦЕСС И ТЕРМОГАЗОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ**

6-е издание, исправленное

*Допущено Министерством образования
Российской Федерации в качестве учебника
для студентов высших учебных заведе-
ний, обучающихся по направлению
«Двигатели летательных аппаратов» и
специальности «Авиационные двигатели и
энергетические установки»*



МОСКВА
«Инновационное МАШИНОСТРОЕНИЕ»
2023

УДК 629.7.036.33(075)
ББК 34.4
К90

Рецензенты: *кафедра авиационных двигателей и энергетических установок Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева;*
Заслуженный деятель науки и техники РФ, академик академии космонавтики, авиации и воздухоплавания, д-р техн. наук, проф. Ю.Н. Нечаев

К90 В.В. Кулагин, В.С. Кузьмичев

Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок: учебник. 6-е изд., испр. В 2 кн. Кн. 1. Основы теории ГТД. Рабочий процесс и термогазодинамический анализ. — М.: Инновационное машиностроение, 2023. — 336 с.: ил.

ISBN 978-5-907523-15-9

ISBN 978-5-907523-16-6 (Кн. 1)

Изложены основные закономерности рабочего процесса ГТД. Отдельные разделы курса обобщены по двигателям различных типов, а за основу принят ТРДД. Книга ориентирована на глубокое освоение методов термогазодинамического анализа, выработку умений применять полученные знания при решении различных по объему и сложности задач, а также на повышение эффективности учебного процесса и развитие творческих способностей студентов.

Для студентов высших технических учебных заведений, обучающихся по направлению "Двигатели летательных аппаратов" и специальности "Авиационные двигатели и энергетические установки".

УДК 629.7.036.33(075)
ББК 34.4

ISBN 978-5-907523-15-9
ISBN 978-5-907523-16-6
(Кн. 1)

© ООО "Издательство "Инновационное машиностроение", 2023

© В.В. Кулагин, В.С. Кузьмичев, 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

От авторов	9
Введение	12
Основные условные обозначения	13

Глава 1. Вводная. Принцип действия, схемы и удельные параметры газотурбинных двигателей	18
1.1. Турбореактивные двигатели ТРДД и ТРД	18
1.2. Турбовинтовые (ТВД), турбовинтовентиляторные (ТВВД) и турбовальные (ТВаД) двигатели	28
1.3. Турбореактивные двигатели с форсажными камерами	34
1.4. Классификация реактивных двигателей	36
1.5. Основные данные и удельные параметры ГТД	38
Контрольные вопросы	41
Задачи	42

ЧАСТЬ I. ХАРАКТЕРИСТИКИ ВХОДНЫХ, ВЫХОДНЫХ УСТРОЙСТВ И КАМЕРЫ СГОРАНИЯ

44

Глава 2. Входные устройства	44
2.1. Общие сведения	44
2.1.1. Назначение входных устройств. Основные параметры режима и критерии эффективности	44
2.1.2. Степень повышения давления π_v и роль входного устройства в системе двигателя	47
2.1.3. Основные требования к входным устройствам и их классификация	50
2.2. Рабочий процесс и характеристики дозвукового воздухозаборника	52
2.2.1. Особенности рабочего процесса	52
2.2.2. Внешнее сопротивление воздухозаборника	56
2.2.3. Характеристики дозвукового воздухозаборника	57
2.3. Особенности работы и характеристики сверхзвуковых нерегулируемых входных устройств внешнего сжатия	58
2.3.1. Основные особенности и режимы работы	58
2.3.2. Дроссельные характеристики	63
2.3.3. Помпаж и зуд	68

2.4. Регулирование сверхзвуковых входных устройств внешнего сжатия	72
2.4.1. Согласование критического сечения и сечения на входе в компрессор	73
2.4.2. Согласование сечения Н с сечениями КР и В	74
2.5. Совместная работа сверхзвукового входного устройства и компрессора	80
2.6. Особенности сверхзвуковых входных устройств внутреннего сжатия	83
Резюме	88
Контрольные вопросы	91
Задачи	93
Глава 3. Выходные устройства	95
3.1. Общие сведения	95
3.1.1. Назначение выходных устройств. Основные параметры режима и критерии эффективности работы	95
3.1.2. Тяговые и расходные характеристики сопла	98
3.1.3. Диаграмма $i-s$ процесса расширения газа в канале сопла и формула скорости истечения	101
3.1.4. Основные требования к выходным устройствам и их классификация	103
3.2. Характеристики дозвуковых выходных устройств	104
3.2.1. Сужающееся сопло	104
3.2.2. Диффузорное выходное устройство	109
3.3. Особенности работы и характеристики сверхзвуковых сопел	111
3.3.1. Сопло Лавала	111
3.3.2. Эжекторные сопла	116
3.3.3. Сопла с центральным телом	120
3.3.4. Регулирование сопел. Плоские сопла	123
3.4. Особенности выходных устройств с реверсом тяги	126
Резюме	129
Контрольные вопросы	132
Задачи	133
Глава 4. Камеры сгорания	135
4.1. Общие сведения	135
4.1.1. Назначение камер сгорания. Необходимые сведения о топливах	135

4.1.2. Основные параметры режима и показатели качества работы камеры сгорания	137
4.1.3. Определение относительного расхода топлива и оценка максимально возможной температуры газа перед турбиной	140
4.1.4. Основные требования к камерам сгорания	143
4.2. Некоторые закономерности горения топлива в потоке	144
4.3. Рабочий процесс основных камер сгорания	148
4.3.1. Схемы основных камер сгорания и их обоснование	148
4.3.2. Подготовка горючей смеси	152
4.3.3. Организация горения топлива	156
4.3.4. Формирование поля температуры газа на выходе из камеры сгорания и охлаждение стенок жаровой трубы	161
4.4. Особенности рабочего процесса форсажных камер сгорания	163
4.5. Основные характеристики камер сгорания	167
4.5.1. Зависимость коэффициента полноты сгорания топлива от параметров режима	167
4.5.2. Потери полного давления в основной и форсажной камерах сгорания ГТД	170
4.5.3. Срывные характеристики	174
4.5.4. Неравномерность температурного поля	177
Резюме	179
Контрольные вопросы	183
Задачи	184

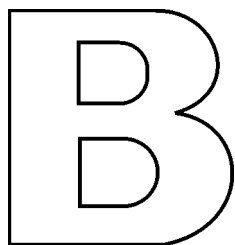
ЧАСТЬ II. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ТРД, ТРДД, ТВД

Глава 5. Газотурбинный двигатель как тепловая машина ...	186
5.1. Диаграмма $i-s$ рабочего процесса основного контура ГТД	187
5.2. Работа цикла ГТД	190
5.3. Зависимость работы цикла от его параметров	192
5.3.1. Зависимость работы цикла от температуры газа перед турбиной	192
5.3.2. Зависимость работы цикла от суммарной степени повышения давления	194
5.4. Эффективный КПД	197
5.5. Зависимость эффективного КПД от параметров цикла	199
Резюме	202

Контрольные вопросы	203
Задачи	203
Глава 6. Силовая установка с газотурбинным двигателем как движитель	205
6.1. Тяга движителя	205
6.2. ТРД и ТВД как частные случаи ТРДД	211
6.3. КПД авиационного движителя	214
6.3.1. Коэффициент гидравлических потерь	215
6.3.2. Полетный КПД	216
6.4. Сравнение различных типов ГТД как движителей	218
6.4.1. Удельная тяга ГТД	218
6.4.2. Зависимость удельной тяги от степени двухконтурности	220
6.5. Наивыгоднейшее распределение энергии между контурами ТРДД	224
6.5.1. Вывод формулы удельной тяги для общего случая распределения энергии между контурами ($c_{cII} \neq c_{cI}$)	224
6.5.2. Зависимость удельной тяги от распределения энергии между контурами ТРДД	225
Резюме	229
Контрольные вопросы	231
Задачи	232
Глава 7. Основные закономерности изменения удельных параметров ГТД	235
7.1. Общий КПД и удельный расход топлива	235
7.2. Зависимость удельной тяги и удельного расхода топлива от параметров цикла	237
7.2.1. Зависимость удельных параметров двигателя от температуры газа перед турбиной	238
7.2.2. Зависимость удельных параметров двигателя от суммарной степени повышения давления	244
7.3. Зависимость удельной тяги и удельного расхода топлива ТРДД от параметров движителя	247
7.4. Зависимость удельной тяги и удельного расхода топлива ГТД от внешних условий	250
7.4.1. Зависимость удельных параметров двигателя от скорости полета	251

7.4.2. Оптимальный ГТД для различных скоростей полета	254
7.4.3. Зависимость удельных параметров двигателя от температуры наружного воздуха	257
7.5. Зависимость удельных параметров двигателя от потерь в узлах	258
7.6. Энергетический баланс ГТД	260
Резюме	262
Контрольные вопросы	264
Задачи	265
ЧАСТЬ III. ТЕРМОГАЗОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ И АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ПРОЕКТИРУЕМОГО ГТД, ОСОБЕННОСТИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ТРДДсм И ТРД(ДФ)	267
Глава 8. Методы проектного термогазодинамического расчета и анализа параметров ГТД	267
8.1. Исходные данные для проектного термогазодинамического расчета ГТД	268
8.2. Методика проектного термогазодинамического расчета одновального ТРД	276
8.2.1. Основные уравнения	276
8.2.2. Последовательность термогазодинамического расчета одновального ТРД	279
8.3. Особенности проектного термогазодинамического расчета ТРДД, ТВД и ТВад	283
8.3.1. Двухконтурные турбореактивные двигатели различных схем	283
8.3.2. ТВад и ТВ(В)Д со свободной турбиной	285
8.3.3. ТВад и ТВ(В)Д с отбором мощности от турбокомпрессора НД(ВД).....	287
8.4. Оценка влияния параметров рабочего процесса, КПД узлов и коэффициентов потерь на удельные параметры ГТД методом малых отклонений	288
8.5. Термогазодинамический анализ влияния КПД узлов, коэффициентов потерь и отбора воздуха на удельные параметры одновального ТРД	294
8.6. Различные методы определения и анализа удельных параметров ГТД	297
Резюме	299
Контрольные вопросы	300
Задачи	302

Глава 9. Особенности рабочего процесса двигателей с форсажными камерами (ТРДФ и ТРДДФ) и со смешением потоков (ТРДДсм)	307
9.1. Особенности ТРДДсм	307
9.1.1. Особенности проектного термогазодинамического расчета ТРДДсм	307
9.1.2. Влияние смешения на выходной импульс	310
9.2. Зависимость удельной тяги и удельного расхода топлива ТРДФ и ТРДДФсм от температуры газа на выходе из форсажной камеры	313
9.3. Зависимость удельной тяги и удельного расхода топлива ТРДФ и ТРДДФсм от температуры газа перед турбиной ...	318
9.4. Зависимость удельной тяги и удельного расхода топлива ТРДДФсм от степени двухконтурности	320
9.5. Зависимость удельной тяги и удельного расхода топлива ТРДФ и ТРДДФсм от степени повышения давления в компрессоре	323
9.6. Особенности термогазодинамического расчета турбореактивных двигателей с форсажными камерами	327
Резюме	329
Контрольные вопросы	331
Задачи	332



ДЛЯ ВУЗОВ

В.В. Кулагин, В.С. Кузьмичев

**ТЕОРИЯ, РАСЧЕТ
И ПРОЕКТИРОВАНИЕ
АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ
И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК**

В двух книгах

Книга вторая

**ОСНОВЫ ТЕОРИИ ГТД. СОВМЕСТНАЯ РАБОТА УЗЛОВ
ВЫПОЛНЕННОГО ДВИГАТЕЛЯ И ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКИ**

6-е издание, исправленное

*Допущено Министерством образования
Российской Федерации в качестве учебника
для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по направлению
«Двигатели летательных аппаратов» и
специальности «Авиационные двигатели и
энергетические установки»*



МОСКВА
«Инновационное МАШИНОСТРОЕНИЕ»
2023

УДК 629.7.036.33(075)
ББК 34.4
К90

Рецензенты: *кафедра авиационных двигателей и энергетических установок Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева;*
Заслуженный деятель науки и техники РФ, академик академии космонавтики, авиации и воздухоплавания, д-р техн. наук, проф. Ю.Н. Нечаев

К90 В.В. Кулагин, В.С. Кузьмичев

Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок: учебник. 6-е изд., испр. В 2 кн. Кн. 2. Основы теории ГТД. Совместная работа узлов выполненного двигателя и его характеристики. – М.: Инновационное машиностроение, 2023. – 280 с.: ил.

ISBN 978-5-907523-15-9

ISBN 978-5-907523-17-3 (Кн. 2)

Изложены основные закономерности совместной работы узлов ГТД. Дан анализ характеристик двигателей различных типов и схем и законов их управления. Отдельные разделы курса обобщены по двигателям различных типов, а за основу принят ГРДД. Книга ориентирована на глубокое освоение методов термодинамического анализа, выработку умений применять полученные знания при решении различных по объему и сложности задач, а также на повышение эффективности учебного процесса и развитие творческих способностей студентов.

Для студентов высших технических учебных заведений, обучающихся по направлению "Двигатели летательных аппаратов" и специальности "Авиационные двигатели и энергетические установки".

УДК 629.7.036.33(075)

ББК 34.4

ISBN 978-5-907523-15-9

ISBN 978-5-907523-17-3

(Кн. 2)

© ООО "Издательство "Инновационное машиностроение", 2023

© В.В. Кулагин, В.С. Кузьмичев, 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	9
Глава 10. Общий анализ уравнений совместной работы узлов выполненного ГТД	11
10.1. Совместная работа входного устройства и компрессора....	11
10.2. Совместная работа турбины и сопла	12
10.3. Совместная работа узлов газогенератора	17
10.3.1. Совместная работа камеры сгорания и турбины ВД	
10.3.2. Совместная работа компрессора и расположенной за ним сети	19
10.3.3. Совместная работа компрессора и турбины ВД	20
10.4. Совместная работа компрессора и турбины НД	25
10.5. Совместная работа всех узлов ГТД	28
Резюме	29
Контрольные вопросы	31
Задачи	33
ЧАСТЬ IV. ТРД(Д) С ОДНИМ УПРАВЛЯЮЩИМ ФАКТОРОМ	35
Глава 11. Основные закономерности совместной работы узлов ТРД(Д)	35
11.1. Основные закономерности совместной работы узлов многовального турбокомпрессора	36
11.1.1. Линия совместной работы	36
11.1.2. Особенности совместной работы узлов двухвального газогенератора	39
11.1.3. Особенности совместной работы узлов турбовентильатора ТРДД	43
11.2. Подобные режимы и формулы приведения	45
11.2.1. Подобные режимы	45
11.2.2. Формулы приведения	47

11.2.3. Приведение параметров к САУ по температуре и давлению в различных сечениях двигателя	50
11.3. Обобщенные характеристики двигателя	54
11.3.1. Основные закономерности изменения параметров турбокомпрессора	54
11.3.2. Анализ зависимости приведенных и относительных параметров двигателя от критериев подобия ...	57
11.3.3. Особенности обобщенных характеристик двухвальных ТРД(Д)	60
11.4. Влияние параметров рабочего процесса на совместную работу узлов и на обобщенные характеристики	64
11.5. Особенности совместной работы узлов ТРДДсм	70
Резюме	74
Контрольные вопросы	77
Задачи	79

Глава 12. Основные характеристики ТРД(Д). Методы их расчета и анализа. Термодинамические основы управления двигателем	84
12.1. Термодинамические основы управления ГТД	84
12.1.1. Эксплуатационные режимы	85
12.1.2. Закон и программа управления	86
12.1.3. Управление ГТД из условия поддержания заданного значения температуры газа перед турбиной	88
12.1.4. Управление турбореактивных двигателей по закону $n_{ВД(НД)} = \text{const}$	91
12.2. Методы расчета и анализа характеристик ГТД	93
12.2.1. Общие сведения. Задание на расчет характеристик	95
12.2.2. Приближенный метод расчета характеристик одновального ТРД	97
12.2.3. Особенности методов расчета характеристик ТРД(Д) различных схем	99
12.2.4. Краткий анализ современных методов расчета характеристик двигателя по заданным характеристикам его узлов	102

12.2.5. Метод расчета обобщенных характеристик двигателя	104
12.3. Анализ основных характеристик ТРД(Д)	106
12.3.1. Дроссельные характеристики	107
12.3.2. Климатические характеристики	110
12.3.3. Высотные характеристики	114
12.3.4. Скоростные характеристики	117
12.3.5. Влияние параметров рабочего процесса, типа, схемы двигателя и законов управления на характеристики ТРД(Д)	119
Резюме	124
Контрольные вопросы	127
Задачи	129
ЧАСТЬ V. ГТД С НЕСКОЛЬКИМИ УПРАВЛЯЮЩИМИ ФАКТОРАМИ....	136
Глава 13. Особенности ТРД(Д) с изменяемыми площадями характерных сечений	136
13.1. Одновальный ТРД (газогенератор) с регулируемой площадью сопла	136
13.1.1. Особенности работы узлов газогенератора и обобщенные характеристики ТРД при $F_{с.кр} = var$	137
13.1.2. Особенности управления одновального ТРД и его характеристики на максимальном режиме при $F_{с.кр} = var$	143
13.1.3. Особенности управления одновального ТРД и его характеристики на режимах пониженной тяги при $F_{с.кр} = var$	149
13.1.4. Структурные схемы управления ТРД при $F_{с.кр} = var$	150
13.2. Одновальный ТРД (газогенератор) с регулируемой турбиной, соплом и компрессором	152
13.2.1. Регулирование турбины	153
13.2.2. Регулирование турбины и сопла	155
13.2.3. Регулирование компрессора	159
13.3. Двухвальный и трехвальный ТРД(Д) с регулируемой соплом, турбиной и компрессором	165

13.3.1. Особенности влияния площади сопла	166
13.3.2. Особенности влияния площади соплового аппарата турбины ВД	169
13.3.3. Особенности влияния площади соплового аппарата турбины НД	171
13.3.4. Особенности влияния площадей характерных сечений в системе многовальных двигателей	172
13.4. Особенности расчета (анализа) характеристик ТРД(Д) с регулируемыми площадями характерных сечений	175
13.4.1. Одновальный ТРД	175
13.4.2. Многовальный ТРД(Д) при $F_{с.кр} = var$	176
Резюме	178
Контрольные вопросы	181
Задачи	184
Глава 14. Особенности ТВД, ТВад и ТРД(Д)Ф	187
14.1. Особенности совместной работы узлов ТВД и ТВад, их обобщенные характеристики	187
14.1.1. Одновальный ТВД	187
14.1.2. ТВад со свободной турбиной	190
14.2. Особенности управления и характеристик одновального ТВД и ТВад со свободной турбиной	193
14.2.1. Особенности управления двигателя	193
14.2.2. Особенности характеристик	195
14.3. Особенности совместной работы узлов ТРД(Д)Ф, их обобщенные характеристики	199
14.3.1. Особенности совместной работы узлов	200
14.3.2. Анализ влияния параметров режима на тягу	202
14.4. Особенности характеристик и управления турбореактивных двигателей с форсажными камерами	206
14.4.1. Особенности характеристик ТРД(Д)Ф	206

14.4.2. Особенности управления ТРД(Д)Ф	213
14.5. Особенности расчета характеристик ТВД(ТВаД) и ТРД(Д)Ф	220
Резюме	221
Контрольные вопросы	225
Задачи	227
Глава 15. Анализ влияния различных факторов на совместную работу узлов ГТД и его характеристики	229
15.1. Влияние числа M_n в условиях докритического истечения газа из сопла	229
15.1.1. Одновальный ТРД	229
15.1.2. ГТД других типов и схем	232
15.2. Влияние КПД узлов и коэффициентов потерь	234
15.2.1. Влияние КПД турбины и компрессора ВД	234
15.2.2. Влияние КПД турбины и компрессора НД	235
15.2.3. Влияние коэффициентов потерь	237
15.3. Влияние отбора воздуха от двигателя	242
15.3.1. ТРД(Д) с отбором воздуха ВД	242
15.3.2. ТРДД с отбором воздуха НД	244
15.4. Влияние отбора мощности от двигателя	245
15.4.1. Двухвальный ГТД с отбором мощности от газогенератора	246
15.4.2. Двухвальный ГТД с отбором мощности от турбокомпрессора НД	246
15.5. Влияние числа Рейнольдса	248
15.6. Некоторые закономерности разброса параметров двухвальных ТРД(Д)	250
15.6.1. Результаты испытаний серийных ТРДД	250

15.6.2. Скольжение частот вращения роторов как фактор, характеризующий термогазодинамическое состояние ТРД(Д)	253
Резюме	255
Контрольные вопросы	257
Список литературы	259
Приложения	263
1. Основные закономерности изменения удельных параметров и проектный термогазодинамический расчет ГТД (краткое содержание курсовой работы)	263
2. Ответы к решению задач, гл. 1 – 9	265
3. Таблица стандартной атмосферы (ГОСТ 4401–81)	268
4. Таблица перевода некоторых единиц измерения физических величин из различных систем в международную систему СИ	269
5. Номограмма для определения относительного расхода топлива ГТД	270
6. Совместная работа узлов и характеристики ГТД (краткое содержание самостоятельной работы)	271
7. Номограмма для определения π_T^*	274
8. Номограмма для определения π_k^*	275
9. Номограмма для расчета линии совместной работы	276
10. Номограмма для определения $\pi_{кнд}^*$	277
11. Ответы к решению задач, гл. 10 – 14	278