

УДК 629.7(075.8)
ББК 39.65
Д56

Издание доступно в электронном виде по адресу
<https://bmstu.press/catalog/item/6551/>

Рецензенты:

д-р техн. наук, профессор *А.А. Козлов*;
д-р техн. наук, профессор *Б.А. Соколов*

Добровольский, М. В.

Д56 Жидкостные ракетные двигатели. Основы проектирования : учебник / М. В. Добровольский ; под ред. Д. А. Ягодникова. — 4-е изд., испр. — Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2020. — 460, [12] с. : ил.

ISBN 978-5-7038-5359-7

Изложены основы проектирования жидкостных ракетных двигателей (ЖРД). Даются основные положения теории, методы расчета и описание узлов и агрегатов двигательных установок с ЖРД. Рассмотрены процессы расширения газов в соплах, смесеобразования и теплообмена, а также методы профилирования сопел, расчета форсунок, определения форм и объема камеры сгорания. Приведены системы подачи с турбонасосными агрегатами и вытеснительные системы подачи с газовым, пороховым и жидкостным аккумуляторами давления. Изложены методики и примеры расчетов элементов конструкции и ЖРД в целом.

Третье издание учебника (2016 г.) было дополнено параметрами, элементами конструкций и пневмогидравлическими схемами отечественных и зарубежных ЖРД конца XX в. В четвертом издании исправлены опечатки и приведены параметры разработанных после выхода в свет третьего издания ЖРД.

Соответствует курсам лекций, читаемых в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Для студентов и магистрантов высших технических учебных заведений. Может быть полезен также инженерам и аспирантам, специализирующимся в области ракетной техники.

УДК 629.7(075.8)
ББК 39.65

- © Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, 2016
- © Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, 2020, с изменениями
- © Оформление. Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020

ISBN 978-5-7038-5359-7

Оглавление

Предисловие председателя редакционного совета	5
Из предисловия к первому изданию	7
Предисловие ко второму изданию	8
Глава 1. Общие сведения о ЖРД	10
1.1. Классификация ЖРД. Топлива	10
1.2. Основные параметры ЖРД	15
1.3. Системы коэффициентов потерь удельного импульса. Расход топлива и основные размеры сопла	22
Глава 2. Сопла ЖРД	27
2.1. Типы сопел и основные требования к ним	27
2.2. Потери удельного импульса в сопле ЖРД	29
2.3. Проектирование конических сопел	37
2.4. Основные исходные положения при построении профилированного сопла	38
2.5. Укороченные и оптимальные сопла	41
2.6. Приближенный метод построения контура оптимального сопла	45
2.7. Работа сопла на нерасчетных режимах при больших противодав- лениях	49
2.8. Работа и характеристики сопел с центральным телом	52
2.9. Расчет сопел с центральным телом	58
Глава 3. Смесеобразование и смесительная головка камеры ЖРД	68
3.1. Основные стадии процессов смесеобразования и горения топлив	68
3.2. Струйные форсунки	79
3.3. Центробежные форсунки	86
3.4. Двухкомпонентные форсунки	102
3.5. Головки камер ЖРД	106
3.6. Влияние конструкции головки на смесеобразование и удельный импульс	112
Глава 4. Охлаждение ЖРД	128
4.1. Теплообмен в ЖРД	128
4.2. Способы охлаждения ЖРД	134
4.3. Процесс конвективной теплоотдачи от газа к стенке	143
4.4. Интегральные соотношения энергии и импульсов для пограничного слоя	150
4.5. Решение интегрального соотношения энергии	162
4.6. Расчет конвективного теплообмена в ЖРД	168
4.7. Пересчет конвективных тепловых потоков	178
4.8. Определение лучистых тепловых потоков	180
4.9. Определение теплоотдачи от стенки к охлаждающей жидкости	187
4.10. Формы охлаждающих трактов камер ЖРД	190
4.11. Расчет теплоотдачи в оребренном охлаждающем тракте	197
4.12. Расчет охлаждения ЖРД	206
4.13. Некоторые специальные случаи охлаждения ЖРД	211
Глава 5. Камеры сгорания ЖРД	222
5.1. Формы и примеры выполненных камер сгорания ЖРД	222
5.2. Определение объема камеры сгорания	229

5.3. Неустойчивое горение.....	231
5.4. Запуск и останов двигателя.....	237
5.5. Импульс последствий.....	243
5.6. Расчет камеры двигателя на прочность.....	248
5.7. Дополнительные замечания.....	251
Глава 6. Двигательные установки.....	254
6.1. Системы подачи.....	254
6.2. Двигательные установки с турбонасосной системой подачи.....	256
6.3. Тяга и удельный импульс двигательной установки.....	263
6.4. Топливные баки.....	266
6.5. Арматура системы подачи.....	272
6.6. Определение давления подачи и гидравлических характеристик системы подачи.....	287
6.7. Системы управления и регулирования ЖРД.....	293
6.8. Примеры выполненных двигателей без дожигания с турбонасосной подачей.....	301
Глава 7. Турбонасосные агрегаты.....	312
7.1. Насосы для подачи компонентов в ЖРД.....	312
7.2. Расчет и характеристики насосов ЖРД.....	325
7.3. Турбины ТНА.....	333
7.4. Совместная работа турбины и насосов.....	346
7.5. Газогенераторы.....	358
Глава 8. Двигательные установки с дожиганием.....	370
8.1. Замкнутая схема «газ + жидкость».....	371
8.2. Двигатель с дожиганием без ЖГГ.....	387
8.3. Схема «газ + газ».....	392
8.4. Основные параметры ЖРД с дожиганием.....	396
Глава 9. Двигательные установки с вытеснительной системой подачи.....	397
9.1. Газобаллонная система подачи.....	398
9.2. Примеры двигательных установок с газобаллонной подачей.....	405
9.3. Редукторы давления газа.....	409
9.4. Характеристики редукторов.....	414
9.5. Расчет редуктора.....	427
9.6. Вытеснительные системы подач с пороховым и жидкостным аккумуляторами давления.....	433
9.7. Двигательные установки с предварительной заправкой.....	445
Список литературы.....	447
Информация по ракетным двигателям в сети Интернет.....	449
Предметный указатель.....	450
Приложение.....	455