

ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр.
3

Предисловие

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

ТЕОРИЯ И ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

<i>Глава I. Общие сведения о реактивных двигателях</i>	5
§ 1. Жидкостный ракетный двигатель	5
§ 2. Реактивные силы	6
§ 3. Сила тяги жидкостного ракетного двигателя	9
Вывод уравнения силы тяги	9
Удельная тяга	13
§ 4. Реактивный двигатель — двигатель прямой реакции	14
Двигатели прямой и непрямой реакции	14
Различные виды двигателей прямой реакции	15
Отличие ЖРД от других видов реактивных двигателей	18
Преобразование энергии в ракетном двигателе	19
§ 5. Классификация жидкостных ракетных двигателей	20
Классификация ЖРД по типу применяемых топлив	20
Классификация ЖРД по способу сжатия и подачи компонентов топлива	22
Классификация ЖРД по назначению	23
§ 6. Области применения ЖРД	23
Космические ракеты	23
Ракеты для исследования высоких слоев атмосферы	24
Ракеты дальнего действия	25
Зенитные ракеты с ЖРД	28
Самолетные ЖРД	29
Летающие бомбы и торпеды с ЖРД	30
Ускорители старта с ЖРД	32
§ 7. Краткий исторический обзор развития жидкостных ракетных двигателей	32
<i>Глава II. Необходимые сведения из термодинамики</i>	41
§ 8. Основные свойства газов	41
§ 9. Энергетические характеристики газов	42
Первый закон термодинамики	42
Внутренняя тепловая энергия и теплосодержание газа	43
Химическая энергия и полное теплосодержание	49
§ 10. Термодинамические процессы в газах	50
Изменение параметров состояния газа при политропических процессах	51
Работа, совершаемая при термодинамических процессах	52
Преобразование энергии при политропических процессах	53
Адиабатический процесс	54

	<i>Стр.</i>
§ 11. Второй закон термодинамики	55
Определение закона	55
Энтропия	56
Энтропия и вероятность состояния газа	58
Обратимость в термодинамических процессах	58
Подсчет численного значения энтропии	60
§ 12. Термодинамические процессы в химически активных га- зах	62
Диссоциация продуктов сгорания	62
Обратимость химических реакций	63
Химическое равновесие в газовой смеси	64
Константа равновесия химической реакции	66
Влияние температуры и давления на состав продуктов сгорания	69
§ 13. Равновесное и неравновесное расширение продуктов сго- рания	71
Равновесное расширение	71
Неравновесное расширение	73
Глава III. Необходимые сведения из газовой динамики	75
§ 14. Основные законы движения газа	75
Уравнение сохранения массы	75
Уравнение сохранения энергии (уравнение Бернулли)	76
§ 15. Скорость звука в газе	78
Скорость звука	78
Вывод формулы для вычисления скорости звука	79
Скорость звука в реагирующем газе	83
Зависимость скорости звука от температуры	84
Скорость звука в движущемся газе	85
Максимальная скорость газа	86
§ 16. Критическая скорость газа и особые свойства сверхзву- кового потока	87
Критическая скорость	87
Число М	88
Понятие о скачках уплотнения	89
Температура торможения	90
§ 17. Элементарная теория сверхзвукового сопла	90
Форма сверхзвукового сопла	90
Критический перепад давления	92
Связь между размерами критического сечения сопла и параметрами газа на входе в сопло	94
Изменение параметров газового потока по длине сопла	96
Глава IV. Термодинамический цикл жидкостного ракетного двигателя	101
§ 18. Цикл жидкостного ракетного двигателя	101
Идеальный цикл ЖРД	101
Соотношение между идеальным циклом и реальными процессами в ЖРД	103
Соотношение между работой цикла и удельной тягой ЖРД	105
§ 19. Система коэффициентов полезного действия ракетного двигателя	106
К. п. д. цикла	106
К. п. д. сгорания	106
К. п. д. расширения	107
Учет затраты рабочего тела на работу системы подачи Энергетическая и импульсная системы к. п. д.	108
	109

§ 20. Термический коэффициент полезного действия идеального цикла	109
Вывод уравнения термического к. п. д. идеального цикла	109
Термический к. п. д. цикла двигателя, работающего на расчетном режиме	111
§ 21. Нерасчетные режимы работы ЖРД	113
Возможность возникновения нерасчетных режимов работы двигателя	113
Возникновение нерасчетных режимов при изменении высоты работы двигателя	114
Возникновение нерасчетных режимов при регулировании тяги ЖРД	115
Возможность существования режима перерасширения	117
§ 22. Термический к. п. д. ЖРД с постоянным соплом на нерасчетных режимах	118
Потеря работы при нерасчетных режимах	118
Изменение η_c двигателя с постоянным соплом при изменении ϵ	120
§ 23. Регулирование сопла ЖРД	121
Регулирование сопла при изменении высоты	121
Регулирование сопла при изменении тяги двигателя путем изменения расхода	122
§ 24. Характеристики ЖРД	123
Расходная характеристика	124
Высотная характеристика	125
Глава V. Топлива жидкостных ракетных двигателей	129
§ 25. Требования к топливам	129
Основные требования к топливам	129
Конструктивные требования к топливам	131
Эксплуатационные требования к топливам	132
§ 26. Термохимические характеристики горючего, окислителя и топлива	133
Весовой состав горючего и окислителя	133
Теоретически необходимое количество окислителя	136
Коэффициент избытка окислителя	138
Весовой состав топлива	140
§ 27. Теплосодержание топлива	141
Физическое теплосодержание топлива	141
Химическая энергия и теплота образования	141
Система отсчета полных теплосодержаний	143
Подсчет полных теплосодержаний горючего, окислителя и топлива	145
Полное теплосодержание продуктов сгорания топлива	148
Связь между полным теплосодержанием и величиной теплотворной способности топлива	149
§ 28. Топлива на основе азотной кислоты и других окислов азота	152
Азотная кислота	152
Присадки к азотной кислоте	153
Тетранитрометан как окислитель	154
Горючие топлив на основе азотной кислоты и окислов азота. Самовоспламеняющиеся топлива	156
§ 29. Топлива на основе жидкого кислорода и перекиси водорода	159
Жидкий кислород	159
Горючие топлив на основе жидкого кислорода	160

	Стр.
Перекись водорода	161
Горючие топлив на основе перекиси водорода	162
Применение перекиси водорода для получения парогаса	163
§ 30. Перспективные топлива для ЖРД	163
Металлические горючие и фтористые окислители	164
Компоненты топлив с повышенной теплотой образования	165
Возможности использования в ракетных двигателях атомной энергии	166
Глава VI. Тепловой расчет камеры двигателя	174
§ 31. Определение температуры и состава продуктов сгорания простейшего топлива	174
Составление системы уравнений для определения состава продуктов сгорания	174
Решение системы уравнения для определения состава продуктов сгорания	176
Влияние давления и температуры на состав продуктов сгорания	179
§ 32. Составление системы уравнений для определения состава и температуры продуктов сгорания в камере двигателя	180
Составление уравнений реакций диссоциации	181
Составление уравнений баланса элементов	184
Дополнительные уравнения для определения состава и температуры продуктов сгорания	185
Окончательный вид системы уравнений и пути разрешения ее	186
§ 33. Решение системы уравнений для определения состава продуктов сгорания топлив, не содержащих азота	189
Система уравнений для определения состава продуктов сгорания	190
Порядок решения системы уравнений для определения состава продуктов сгорания	190
§ 34. Решение системы уравнений для определения состава продуктов сгорания топлив, содержащих азот	194
Система уравнений для определения состава продуктов сгорания	194
Приведение полученной системы уравнений к рабочим формулам	196
Порядок решения системы уравнений для определения состава продуктов сгорания	199
§ 35. Тепловой расчет камеры двигателя	201
Определение теоретической температуры и состава продуктов сгорания в камере двигателя	201
Определение энтропии продуктов сгорания в камере сгорания	201
Расчет состава и температуры газа на срезе сопла	202
Определение скорости истечения	203
Определение теоретической удельной тяги и размеров сопла	204
Тепловой расчет ЖРД по диаграмме полное теплосодержание — энтропия	205
§ 36. Влияние температуры, давления в камере двигателя и соотношения компонентов топлива на параметры ЖРД	207
Влияние температуры	207
Влияние давления в камере сгорания	208
Влияние соотношения компонентов в топливе	210

	<i>Стр.</i>
§ 37. Экспериментальные коэффициенты двигателя и расчет действительной удельной тяги	210
Коэффициент удельной тяги	210
Экспериментальное определение коэффициента камеры и коэффициента сопла (φ_k и φ_c)	212
Тепловой расчет двигателя с учетом экспериментальных коэффициентов	214
§ 38. Примеры расчета сгорания и истечения	215
Тепловой расчет ЖРД, работающего на азотосодержащем топливе	215
Расчет состава продуктов сгорания топлива, не содержащего азота	227
Глава VII. Охлаждение жидкостных ракетных двигателей	231
§ 39. Основные сведения из курса теплопередачи	231
Передача тепла	231
Теплообмен путем теплопроводности	232
Теплообмен путем конвекции	233
Формулы для подсчета коэффициента теплоотдачи	235
Лучистый теплообмен	238
Лучистый теплообмен в газах	241
§ 40. Теплообмен в ЖРД	243
Физическая картина процесса теплообмена в ЖРД	243
Особенности теплообмена в ЖРД	244
Зависимость $T_{г.ст}$ от скорости движения охлаждающей жидкости	245
Влияние поверхностного кипения охлаждающей жидкости на величину $T_{г.ст}$	246
Зависимость $T_{г.ст}$ от теплопроводности материала камеры двигателя λ	247
Зависимость $T_{г.ст}$ от толщины стенки камеры двигателя $\delta_{ст}$	248
Влияние давления в камере сгорания на величину $T_{г.ст}$ и q_g	248
Влияние температуры в камере сгорания на величину $T_{г.ст}$	249
§ 41. Расчет наружного охлаждения	249
Схемы наружного охлаждения	249
Порядок расчета наружного охлаждения камеры двигателя	251
Определение конвективных удельных тепловых потоков в стенку камеры двигателя	252
Определение лучистых удельных тепловых потоков и суммарного теплового потока в стенку камеры двигателя	257
Проверка наличия необходимого количества охлаждающей жидкости и определение ее подогрева на каждом участке	258
Определение коэффициента теплоотдачи от жидкостной стенки к охлаждающей жидкости $\alpha_{ж.ст}$ и температуры жидкостной стенки камеры двигателя $T_{ж.ст}$	259
Проверка соответствия принятого и рассчитанного распределения температуры газовой стенки $T_{г.ст}$	260
§ 42. Формы охлаждающих трактов камер двигателя	261
Щелевой канал	261
Охлаждающий тракт в виде винтового щелевого канала	262
§ 43. Пример расчета наружного охлаждения камеры двигателя	264
§ 44. Другие виды охлаждения ЖРД	270
Внутреннее охлаждение	271

Смешанное охлаждение	275
Защита стенок камеры двигателя от прогорания с помощью покрытий или путем аккумуляции тепла	276

ЧАСТЬ ВТОРАЯ

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

<i>Глава VIII. Проектирование камеры двигателя</i>	<i>282</i>
§ 45. Процесс сгорания в камере сгорания ЖРД	282
Особенности процесса сгорания в камере сгорания ЖРД	282
Схема протекания процесса сгорания	283
§ 46. Определение объема камеры сгорания ЖРД	284
Определение объема камеры сгорания по времени пребывания топлива в камере	285
Определение объема камеры сгорания по приведенной длине камеры	286
Определение объема камеры сгорания по теплонпряженности	287
Определение объема камеры сгорания по литровой тяге	288
§ 47. Формы камер сгорания	289
Шарообразные камеры сгорания	289
Цилиндрические камеры сгорания	294
Конические камеры сгорания	297
§ 48. Проектирование сопла камеры двигателя	298
Основные требования к конструкции сопла	298
Потери в сопле и способы уменьшения их	299
Расчет геометрических размеров сопел различных типов	301
§ 49. Форсунки для распыла топлива	302
Струйные форсунки	305
Расчет струйных форсунок	305
Центробежные форсунки	308
Движение жидкости по центробежной форсунке	309
Расчет центробежных форсунок	313
§ 50. Смесеобразование в ЖРД и проектирование головок	314
Процесс смесеобразования и требования к нему	314
Типы головок ЖРД	315
Размещение на головке форсунок и других устройств	316
Порядок проектирования головки	320
§ 51. Общие вопросы проектирования камеры двигателя	321
Материалы, применяемые для изготовления камеры	321
Условия работы материала стенок камеры двигателя	323
Некоторые замечания по конструкции камеры	326
Примерный порядок проектирования камеры двигателя	326
§ 52. Запуск и остановка ЖРД	327
Основные требования к запуску и остановке ЖРД	327
Классификация ЖРД по условиям эксплуатации	328
Способы зажигания	329
Остановка двигателя	330
<i>Глава IX. Системы подачи жидкостных ракетных двигателей</i>	<i>333</i>
§ 53. Типы систем подачи	333
Основные элементы систем подачи	333
Насосная система подачи	333
Баллонная и другие вытеснительные системы подачи	335
§ 54. Проектирование баков	336
Типы баков и требования, предъявляемые к ним	336

	<i>Стр.</i>
Геометрические формы и взаимное расположение баков	337
Внутреннее устройство баков	340
Расчет объема баков	341
Расчет баков на прочность	343
Материалы для баков	344
§ 55. Расчет размера баллона и запаса газа при баллонной подаче	346
Изменение температуры вытесняющего газа в процессе подачи	346
Расчет объема баллона и запаса газа	348
Расчет баллонов на прочность	350
Выбор начального давления в баллоне	351
§ 56. Расчет порохового и жидкостного аккумуляторов давления	352
Устройство и работа порохового аккумулятора давления	352
Расчет размеров шашки ПАД	353
Расчет жидкостного аккумулятора давления	357
§ 57. Редуктор давления газа	358
Устройство и работа редуктора	358
Работа редуктора обратного действия	359
Характеристики редуктора обратного действия	361
Требования, предъявляемые к редукторам ЖРД	366
Порядок расчета редуктора	366
Расчет размеров клапана редуктора	367
Определение затяжки пружин Q_1 и Q_2 и поверхности F_m	369
§ 58. Пример расчета редуктора	370
§ 59. Насосы для подачи компонентов	374
Схема центробежного насоса и основные величины, характеризующие его. Коэффициент быстроходности	375
План скоростей и направление лопаток на входе в колесо	377
План скоростей на выходе из колеса	380
Теоретический напор, создаваемый насосом	382
Гидравлические потери в колесе и гидравлический к. п. д.	384
Работа и мощность насоса, к. п. д. насоса	386
§ 60. Расчет насосов, применяемых в ЖРД	387
Порядок расчета центробежного насоса	387
Пример расчета центробежного насоса	396
Расчет шестеренчатых насосов	401
§ 61. Кавитация и выбор числа оборотов насоса	404
Сущность явления кавитации	404
Расчет насоса на кавитацию	406
Напор на всасывании насоса и его определение	408
§ 62. Турбины, турбонасосные агрегаты и парогазогенераторы ЖРД	412
Одноступенчатая активная турбина	413
Активная турбина с двумя ступенями скорости	416
Турбонасосный агрегат двигателя ракеты А-4	417
Турбонасосный агрегат двигателя «Вальтер»	419
Насосы двигателей Р-3395 и Р-3390	423
Парогазогенераторы ЖРД	429
Порядок расчета турбонасосного агрегата и парогазогенератора	431
§ 63. Арматура систем подачи ЖРД	435
Арматура баков	435
Отсечные и обратные клапаны	436
Прочая арматура	440

§ 64. Определение гидравлических потерь в системе подачи ЖРД	443
Определение гидравлических потерь в охлаждающем тракте камеры двигателя	444
Определение гидравлических потерь в трубопроводах и арматуре	447
Глава X. Описание схем выполненных жидкостных ракетных двигателей	451
§ 65. Схема двигателя ракеты А-4	451
Заправка двигателя и подготовка его к запуску	452
Запуск двигателя и выход его на главную ступень	454
Работа двигателя в полете и остановка его	455
§ 66. Схемы двигателей зенитных ракет	456
Схема двигателя ракеты «Вассерфаль»	456
Схема двигателя ракеты «Шметтерлинг»	457
Схема двигателя зенитной неуправляемой ракеты «Тайфун»	459
§ 67. Схемы самолетных двигателей различного назначения	460
Схема самолетного двигателя «Вальтер»	460
Схема самолетного ускорителя маневра	463
Схема двигателя летающей бомбы	465
Схема двигателя «Шмиддинг»	466
Приложения:	
1. Таблицы десятичных логарифмов констант равновесия	469
2. Константы равновесия	472
3. Полное теплосодержание продуктов сгорания $I_{пi}$ топлив ЖРД (в кал/граммоль °С)	474
4. Таблица энтропий продуктов сгорания S_{oi} топлив ЖРД (в кал/граммоль °С)	476
Литература	478
Рекомендуемая литература	479

Геннадий Борисович Синярев
и *Мстислав Владимирович Добровольский*
ЖИДКОСТНЫЕ РАКЕТНЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Издательский редактор *Г. Ф. Лосева*
Технич. редактор *И. М. Зудакин*

Г-15130 Подписано в печать 17/X 1955 г. Учетно-изд. л. 34,49.
Формат бумаги 60×92¹/₁₆=16,38 бум. л.— 31,75 печ. л., в т/ч. 5 вкл.
Цена в пер. 13 р. 60 к. Зак. 456/1424

Типография Оборонгиза