

# ОГЛАВЛЕНИЕ

08	Условные обозначения, индексы и сокращения	5
08	Условные обозначения	5
08	Индексы	7
08	Сокращения	7
76	Введение	8
09	<b>Глава 1</b>	
09	Принципы действия реактивных двигателей	14
10	1.1. Классификация реактивных двигателей	14
10	1.2. Источники энергии для ракетных двигателей	15
10	1.3. Химические ракетные топлива	17
10	1.4. Термодинамические циклы воздушно-реактивных и ракетных двигателей	18
09	<b>Глава 2</b>	
09	Основные характеристики РДТТ. Тяга двигателя	26
09	2.1. Режимы работы сопла	29
09	2.2. Удельный импульс тяги	31
09	2.3. Расходный комплекс и характеристическая скорость	32
09	2.4. Тяговый комплекс и коэффициент тяги	32
09	2.5. Использование газодинамических функций для определения тяги, удельного импульса тяги и тягового комплекса	33
09	2.6. Коэффициенты полезного действия двигателя	35
09	2.7. Полный импульс тяги и его связь с удельным импульсом и расходом топлива	39
09	2.8. Мощность	40
09	2.9. Удельная масса. Коэффициент массового совершенства РДТТ	40
09	<b>Глава 3</b>	
09	Конструкционные, теплозащитные и теплоэрозионностойкие материалы и методы расчета массовых и геометрических характеристик	41
09	3.1. Требования к материалам	41
09	3.2. Конструкционные материалы	42
09	3.3. Теплозащитные материалы и методы расчета уноса массы	45
09	3.4. Материалы для соплового аппарата	52
09	3.5. Работоспособность вкладыша критического сечения соплового аппарата	54
09	3.6. Схебно-конструктивные и массовые характеристики систем и подсистем двигателя	60

<b>Глава 4</b>	
<b>Твердые топлива и заряды ТТ</b> . . . . . 86	
4.1.	Общие положения . . . . . 86
4.2.	Требования, предъявляемые к твердым топливам . . . . . 86
4.3.	Химический состав и энергетические характеристики твердых топлив . . . . . 87
4.4.	Типы твердых топлив . . . . . 90
4.5.	Способы формирования зарядов ТТ . . . . . 94
4.6.	Технические требования к заряду ТТ . . . . . 95
4.7.	Типы зарядов ТТ . . . . . 96
4.8.	Выбор формы заряда ТТ из условия минимизации тепловых потоков и трения на заднем днище . . . . . 100
4.9.	Расчет поверхности горения, геометрических характеристик и массы зарядов твердого топлива . . . . . 101
<b>Глава 5</b>	
<b>Термодинамический расчет состава гомогенных и гетерогенных продуктов горения и энергетических характеристик топлив</b> . . . . . 104	
5.1.	Общие положения . . . . . 104
5.2.	Внутренняя энергия, энтальпия и теплота . . . . . 105
5.3.	Теплота сгорания и теплота образования . . . . . 107
5.4.	Термодинамические функции . . . . . 111
5.5.	Основные исходные данные и допущения для термодинамического расчета . . . . . 112
5.6.	Термодинамический расчет состава продуктов сгорания и температуры при постоянном давлении. Термодинамическая диссоциация . . . . . 117
5.7.	Термодинамический расчет продуктов горения при истечении из соплового аппарата . . . . . 124
5.8.	Термодинамический и теплофизический методы определения состава и свойств гетерогенных систем . . . . . 126
<b>Глава 6</b>	
<b>Энергетические характеристики. Потери удельного импульса тяги</b> . . . . . 140	
6.1.	Соотношения для тягово-энергетических характеристик с учетом потерь . . . . . 140
6.2.	Потери удельного импульса тяги в камере сгорания и сопловом блоке . . . . . 143
6.3.	Потери удельного импульса тяги в камере сгорания . . . . . 145
6.4.	Потери удельного импульса тяги в сопловом блоке . . . . . 156
6.5.	Потери, связанные с использованием ТЗП и разгаром критического сечения сопла . . . . . 172
6.6.	Принципы профилирования сопел из условия минимизации потерь . . . . . 173
<b>Глава 7</b>	
<b>Ламинарное и турбулентное течения продуктов сгорания</b> . . . . . 175	
7.1.	Общая система уравнений, описывающая течение вязкого газа . . . . . 175
7.2.	Двумерное ламинарное течение продуктов сгорания . . . . . 177
7.3.	Одномерное ламинарное течение продуктов сгорания . . . . . 179
7.4.	Турбулентное течение продуктов сгорания в камере . . . . . 180
<b>Глава 8</b>	
<b>Процессы горения твердых топлив в камере сгорания</b> . . . . . 184	
8.1.	Механизм стационарного горения твердых топлив . . . . . 184
8.2.	Законы скорости стационарного горения . . . . . 188
8.3.	Нестационарная скорость горения ТТ . . . . . 190
8.4.	Возникновение турбулентного горения заряда твердого топлива в камере сгорания . . . . . 193

8.5. Экспериментальное определение коэффициента турбулентного горения и пороговой скорости	212
8.6. Нестабильное горение заряда ТТ	214
8.7. Процессы горения металлических частиц в камере сгорания	221

### Глава 9

Пределные условия работы РДТТ	237
9.1. Выбор предельного давления в камере сгорания	237
9.2. Пределные условия заряжания РДТТ	238
9.3. Гидродинамические потери в предсопловом объеме РДТТ	239
9.4. Определение максимального давления в камере сгорания в начальный период работы двигателя	245
9.5. Влияние деформирования заряда ТТ на объемную плотность заряжания камеры сгорания	249

### Глава 10

Тепломассообмен в камере сгорания и сопловом аппарате	251
10.1. Общие положения	251
10.2. Конвективный теплообмен. Характер течения и теплообмена в пограничном слое	253
10.3. Радиационный теплообмен	276
10.4. Тепловое состояние элементов конструкции энергетической системы	280
10.5. Взаимодействие продуктов горения ТТ с поверхностью стенки энергетической системы	283

### Глава 11

Математическая модель движения многофазной среды при наличии процессов горения, испарения и конденсации частиц	291
11.1. Общие положения	291
11.2. Физические предпосылки	291
11.3. Математическая постановка	295
11.4. Взаимодействие частиц с газовым потоком	310
11.5. Разностные методы	314

### Глава 12

Нестационарное движение двухфазных продуктов горения в одномерной постановке	319
12.1. Механизм взаимодействия двухфазных продуктов сгорания	319
12.2. Нестационарное течение двухфазных продуктов сгорания в камере сгорания	320
12.3. Математическая модель движения двухфазной реагирующей среды в канале заряда ТТ в квазиодномерном приближении	322
12.4. Методы расчета параметров и характеристик двухфазных реагирующих продуктов горения	328
12.5. Основные уравнения одномерного течения двухфазных продуктов сгорания в сопле	332

### Глава 13

Двумерное течение гомогенных продуктов горения в камере сгорания	336
13.1. О подобии продольной и радиальной составляющих вектора скоростей	336
13.2. Система уравнений и граничные условия	338
13.3. Преобразование дифференциального уравнения в интегральное и определение составляющих профиля скоростей	341
13.4. Профили скоростей в осесимметричном канале заряда ТТ	342

## Глава 14

14.0	<b>Математическое описание нестационарного процесса движения гомогенных продуктов горения в каналах заряда ТТ различной формы</b> . . . . .	344
14.1	Обоснование принятых допущений . . . . .	344
14.2	Система интегрально-дифференциальных уравнений течения гомогенных продуктов горения в камере сгорания . . . . .	345
14.3	Преобразование системы интегрально-дифференциальных уравнений к системе дифференциальных уравнений . . . . .	349
14.4	Система уравнений для различных случаев течения гомогенных продуктов горения . . . . .	350
14.5	Система уравнений для нестационарного периода функционирования РДТТ в нульмерной постановке . . . . .	352

## Глава 15

15.0	<b>Механизм воспламенения заряда ТТ и выход двигателя на стационарный режим работы</b> . . . . .	360
15.1	Основные требования к воспламенительным устройствам . . . . .	360
15.2	Типы воспламенительных устройств . . . . .	361
15.3	Пиротехнические составы . . . . .	362
15.4	Конструкции воспламенительных устройств . . . . .	364
15.5	Физическая модель процесса воспламенения . . . . .	368
15.6	Механизм зажигания твердых топлив и условия воспламенения . . . . .	372
15.7	Виды теплоотдачи от продуктов сгорания ВС к поверхности заряда ТТ . . . . .	375
15.8	Скорость газообразования воспламенительного состава . . . . .	378
15.9	Принципы построения математических моделей процесса воспламенения . . . . .	380
15.10	Уравнения, описывающие нестационарный процесс для воспламенительного периода . . . . .	381
15.11	Одномерная нестационарная модель выхода двигателя на стационарный режим работы . . . . .	387
15.12	Методы расчета параметров рабочего процесса для воспламенительного периода в нульмерной постановке . . . . .	389
15.13	Нульмерная нестационарная модель выхода двигателя на стационарный режим с дожиганием продуктов горения . . . . .	391
15.14	Приближенный метод определения временных характеристик двигателя . . . . .	394
15.15	Воспламенение заряда ТТ с торцевой поверхностью горения . . . . .	395

## Глава 16

16.0	<b>Методы расчета газодинамических параметров рабочего процесса в камере сгорания для квазистационарного режима работы РДТТ</b> . . . . .	400
16.1	Изменение характера течения продуктов сгорания в зависимости от объемной плотности заряжания . . . . .	400
16.2	Численные методы расчета газодинамических параметров рабочего процесса . . . . .	400
16.3	Течение продуктов сгорания с постоянным тепловыделением по длине канала заряда ТТ . . . . .	408
16.4	Течение продуктов сгорания с постоянным тепловыделением и малоизменяющейся площадью поперечного сечения канала . . . . .	410
16.5	Методы решения задачи на компьютере . . . . .	412
16.6	Аналитический метод расчета газодинамических параметров рабочего процесса . . . . .	414

## Глава 17

17.0	<b>Режимы работы РДТТ для периода спада давления в камере сгорания</b> . . . . .	418
17.1	Способы прекращения работы двигателя . . . . .	418
17.2	Физические процессы, протекающие в камере сгорания РДТТ при вскрытии дополнительных отверстий . . . . .	420

17.3.	Критические условия прекращения работы двигателя	421
17.4.	Методы расчета давления и температуры продуктов сгорания после вскрытия дополнительных отверстий	424
17.5.	Приближенный метод определения площади дополнительных отверстий, обеспечивающих гашение заряда ТТ	426
17.6.	Физические основы процесса гашения заряда ТТ посредством впрыска жидкого хладагента в камеру сгорания	427
17.7.	Математическое описание процесса в камере сгорания при гашении заряда ТТ впрыском охлаждающей жидкости	429
17.8.	Метод расчета скорости снижения давления при гашении заряда ТТ комбинированным способом	438
<b>Глава 18</b>		
<b>Методы расчета разбросов основных параметров рабочего процесса</b>		
18.1.	Выходные и внутренние параметры	442
18.2.	Математическое ожидание, дисперсия, корреляционный момент	443
18.3.	Теоретический метод определения разбросов параметров и характеристик рабочего процесса	446
18.4.	Определение разбросов основных параметров рабочего процесса РДТТ методом статистических испытаний	455
<b>Глава 19</b>		
<b>Особенности протекания внутрикамерных процессов во вращающихся РДТТ</b>		
19.1.	Постановка вопроса	460
19.2.	Физико-математическая модель течения продуктов горения во вращающихся РДТТ	461
19.3.	Массовый расход продуктов сгорания через сопло	466
19.4.	Метод расчета давления в камере сгорания	467
<b>Глава 20</b>		
<b>Динамо-реактивные системы</b>		
20.1.	Принципы действия	470
20.2.	Система уравнений внутрикамерных процессов в заснарядном объеме	471
20.3.	Тепловые потери в заснарядном объеме динамо-реактивной системы	478
20.4.	Расчет давления в ракетном двигателе в период его движения в стволе	482
<b>Глава 21</b>		
<b>Ракетно-прямоточный воздушно-реактивный двигатель и его модификации</b>		
21.1.	Принципы действия и схемно-конструктивные модификации ПВРД	484
21.2.	Тягово-энергетические параметры ракетно-прямоточного двигателя и их связь с динамикой полета летательного аппарата	487
21.3.	Физико-математическое описание рабочего процесса ракетно-прямоточного двигателя на гибридном топливе	494
21.4.	Схемно-конструктивные решения и методы расчета параметров рабочего процесса ГРД (газогенератора)	503
21.5.	Выбор стартовой ступени летательного аппарата с РПВРД	511
<b>Глава 22</b>		
<b>Система управления вектором тяги</b>		
22.1.	Потребные управляющие силы	518
22.2.	Типы систем управления вектором тяги и основные требования к ним	524

183	22.3. Шарнирный момент .....	525
183	22.4. Качающееся управляющее сопло (КУС) .....	527
183	22.5. Разрезное управляющее сопло (РУС) .....	530
183	22.6. Газовые руды .....	531
183	22.7. Сопло со сферическим дефлектором .....	532
183	22.8. Сопло с управляющими щитками (триммерами) .....	533
183	22.9. Вдув рабочего вещества в расширяющуюся часть сопла .....	536
183	22.10. Вырыск управляющей жидкости в расширяющуюся часть сопла .....	539
183	<b>Глава 23</b> .....	
183	<b>Методы проектной оптимизации параметров РДТТ</b> .....	541
183	23.1. Общие методические положения .....	541
183	23.2. Комплексные показатели качества .....	542
183	23.3. Критерии эффективности .....	547
183	23.4. Численный эксперимент проектной оптимизации РДТТ .....	550
183	23.5. Основные требования к технологичности конструкций .....	559
183	<b>Глава 24</b> .....	
183	<b>Способы повышения работоспособности композиционных материалов и элементов из них в сопловых аппаратах двигателей</b> .....	564
183	24.1. Постановка вопроса .....	564
183	24.2. Анализ опытных данных и выбор формы входного участка сопла .....	565
183	24.3. Выбор материалов для проточного тракта сопла .....	568
183	24.4. Влияние начального напряженного состояния композиционных материалов на работоспособность элементов сопла .....	570
183	24.5. Технологические способы повышения стойкости и термостойкости элементов двигателя .....	574
183	<b>Литература</b> .....	581
183	<b>Предметный указатель</b> .....	584