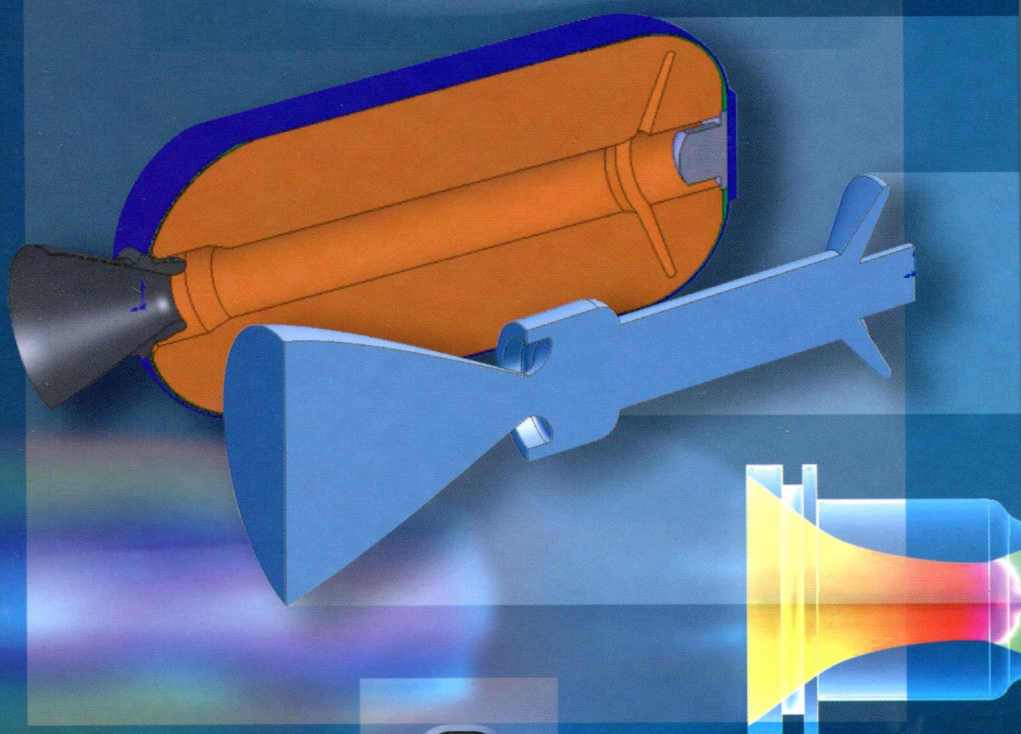


Газовые течения в соплах энергоустановок



Газовые течения в соплах энергоустановок

Под редакцией проф. В.Н. Емельянова



**МОСКВА
ФИЗМАТЛИТ®
2017**

УДК 532.529

ББК 22.253

Г 13

Авторский коллектив:

Волков К.Н., Емельянов В.Н., Тетерина И.В., Яковчук М.С.

Газовые течения в соплах энергоустановок / Под ред. проф. В.Н. Емельянова. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2017. — 328 с. — ISBN 978-5-9221-1718-0.

Рассматриваются вопросы, связанные с исследованием внутренней газодинамики ракетных двигателей, и обобщается опыт численного моделирования сопловых течений. Осуществляется анализ разнообразных методов, позволяющих оценить характер формирующихся течений, определить газодинамические характеристики и параметры теплообмена. Приводятся результаты расчетов внутренних течений, возникающих в задачах управления их характеристиками за счет отклонения сопла и вдува струи в его сверхзвуковую часть. Разработанные модели и подходы позволяют путем проведения вычислительного эксперимента оптимизировать проектные параметры сопловых устройств, а также дать практические рекомендации по организации течений в технических и технологических приложениях.

Монография предназначена научным работникам, специализирующимся в области аэрокосмической техники, инженерно-техническим работникам, занимающимся проектированием энергоустановок, а также преподавателям, аспирантам и студентам соответствующих специальностей старших курсов высших учебных заведений.

ISBN 978-5-9221-1718-0

© ФИЗМАТЛИТ, 2017

© Коллектив авторов, 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	7
Введение	11
Внутрикамерная газодинамика	12
Имеющиеся публикации	16
Список литературы	21
Глава 1. Модели и методы решения задач внутрикамерной газодинамики	23
1.1. Конструктивные схемы	24
1.1.1. Канал заряда твердого топлива	24
1.1.2. Сопловой блок	26
1.1.3. Органы управления	28
1.2. Газодинамические процессы	31
1.2.1. Течения в каналах со вдувом	31
1.2.2. Эрозионное горение	34
1.2.3. Течения в предсопловом объеме	35
1.2.4. Сопловые течения	38
1.2.5. Течения, наводимые органами управления	40
1.2.6. Течения, наводимые поворотом управляющего сопла	41
1.2.7. Течения, наводимые элементами отбора и сброса газа	43
1.2.8. Течения в заманжетной полости	43
1.2.9. Течения во вращающихся двигателях	44
1.2.10. Течения в условиях действия массовых сил	45
1.2.11. Тепловая защита	46
1.2.12. Вихревые структуры	47
1.2.13. Двухфазные течения	49
1.2.14. Сепарация частиц	52
1.2.15. Неустойчивость рабочих процессов	53
1.2.16. Динамика распространения послестартового облака	55
1.2.17. Газодинамические процессы в задачах утилизации зарядов	56
1.2.18. Профилирование сопла	58
1.3. Размерность модели	59
1.3.1. Квазистационарные модели	59
1.3.2. Нульмерные модели	60
1.3.3. Одномерные модели	60
1.3.4. Двумерные модели	61
1.3.5. Зонные модели	62
1.3.6. Трехмерные модели	63
1.4. Уровень физической сложности	64

Глава 2. Газовая динамика поворотного управляющего сопла . . .	68
2.1. Газовая динамика поворотного утолщенного сопла при его угловом отклонении	69
2.1.1. Поворот сопла	69
2.1.2. Геометрическая модель	73
2.1.3. Расчетная сетка	75
2.1.4. Поворот модели	75
2.1.5. Граничные условия	78
2.1.6. Вычислительная процедура	80
2.1.7. Результаты расчетов	80
2.1.8. Расходные характеристики	92
2.2. Газовая динамика утолщенного сопла при его смещении в радиальном направлении	95
2.2.1. Смещение сопла	96
2.2.2. Модель и граничные условия	98
2.2.3. Вычислительная процедура	100
2.2.4. Течение в кольцевом канале	100
2.2.5. Результаты расчетов	102
2.3. Обтекание утолщенного сопла двухфазным потоком	106
2.3.1. Течение в предсопловом объеме	106
2.3.2. Газовая фаза	108
2.3.3. Конденсированная фаза	109
2.3.4. Вычислительная процедура	110
2.3.5. Результаты расчетов	111
2.4. Обтекание поворотного утолщенного сопла двухфазным потоком	118
2.4.1. Поворотное утолщенное сопло	118
2.4.2. Геометрическая модель	122
2.4.3. Газовая фаза	123
2.4.4. Конденсированная фаза	124
2.4.5. Вычислительная процедура	124
2.4.6. Результаты расчетов	125
2.4.7. Осаждение частиц	129
2.5. Влияние частиц на сопловые течения	131
2.5.1. Движение частиц в сопле	131
2.5.2. Двухфазные течения в соплах	132
2.5.3. Результаты расчетов	145
2.5.4. Сравнение предельных решений с результатами численного моделирования	147
2.6. Газовая динамика раздвижного сопла при его приведении в рабочее положение	149
2.6.1. Раздвижное сопло	150
2.6.2. Геометрическая модель	153
2.6.3. Расчетные сетки	153
2.6.4. Вычислительная процедура	157
2.6.5. Результаты расчетов	158

Глава 3. Управление сопловыми течениями при помощи вдува . . .	162
3.1. Вдвух струи с поверхности плоской пластины в сверхзвуковой поток	163
3.1.1. Вдвух сверхзвуковой струи	163
3.1.2. Геометрия и граничные условия	168
3.1.3. Расчетные сетки	170
3.1.4. Вычислительная процедура	171
3.1.5. Структура течения	171
3.1.6. Сравнение моделей турбулентности	173
3.1.7. Сравнение вариантов расчета	176
3.2. Параметрическое исследование параметров вдува	177
3.2.1. Вдвух сверхзвуковой струи	178
3.2.2. Геометрия и граничные условия	179
3.2.3. Вычислительная процедура	180
3.2.4. Результаты расчетов	180
3.3. Вдвух импульсной струи в сверхзвуковой поток	184
3.3.1. Нестационарный вдув	184
3.3.2. Геометрическая модель	188
3.3.3. Расчетная сетка	189
3.3.4. Регулирование расхода газа через сопло	190
3.3.5. Вычислительная процедура	191
3.3.6. Стационарная картина течения	192
3.3.7. Развитие процесса во времени	196
3.4. Взаимодействие струи вдуваемого газа со сверхзвуковым потоком в сопле.	200
3.4.1. Струйные органы управления	200
3.4.2. Геометрическая модель	204
3.4.3. Граничные условия	205
3.4.4. Расчетная сетка	206
3.4.5. Вычислительная процедура	207
3.4.6. Результаты расчетов	207
3.5. Управление вектором тяги при помощи вдува импульсной струи . .	211
3.5.1. Управление вектором тяги	211
3.5.2. Геометрическая модель	213
3.5.3. Расчетная сетка	213
3.5.4. Граничные условия	215
3.5.5. Вычислительная процедура	216
3.5.6. Результаты расчетов	217
3.6. Оптимизация струйных органов управления вектором тяги	220
3.6.1. Оптимизация параметров вдува	220
3.6.2. Геометрическая модель	223
3.6.3. Расчетные сетки	224
3.6.4. Вычислительная процедура	227
3.6.5. Результаты расчетов	229
Глава 4. Сопловые течения с нестационарным подводом энергии	234
4.1. Течения с подводом энергии	235
4.1.1. Внешние течения	235

4.1.2. Внутренние течения	238
4.2. Устройства, работающие в условиях нестационарного энергоподвода	240
4.2.1. Электродуговые плазмотроны	240
4.2.2. Плазмотроны переменного тока	241
4.2.3. Высокочастотные плазмотроны	241
4.2.4. Вихревая стабилизация дугового разряда	242
4.2.5. Высоковольтные выключатели грозовой защиты	242
4.2.6. Лазерные источники плазмы	243
4.2.7. Энергоустановки с горением	244
4.3. Математическая модель	244
4.3.1. Основные уравнения	244
4.3.2. Начальные и граничные условия	246
4.3.3. Численный метод	246
4.3.4. Учет реальных свойств газа	248
4.4. Модель подвода энергии	251
4.4.1. Распределение температуры	251
4.4.2. Распределение интенсивности энергоподвода	252
4.5. Постановка задачи и тестовые расчеты	254
4.5.1. Геометрия канала и сетка	254
4.5.2. Подвод энергии	255
4.5.3. Тестовые задачи	256
4.6. Квазиодномерные течения	259
4.7. Двумерные течения	263
4.8. Течения реального газа	266
Глава 5. Геометрическое управление сопловыми течениями	270
5.1. Аэродинамические окна напорного типа	271
5.2. Метод расчета	273
5.2.1. Построение разностной схемы	274
5.2.2. Течения в каналах	276
5.3. Тестовые задачи	280
5.3.1. Течение от сверхзвукового источника	280
5.3.2. Течение, возникающее в результате распада разрыва	280
5.3.3. Обтекание дуги окружности	281
5.4. Сверхзвуковые струи	283
5.5. Профилирование сопла	287
Заключение	293
Приложение А. Свойства реального газа	299
А.1. Термодинамика реального газа	299
А.2. Идеальный диссоциирующий газ	301
А.3. Модель Крайко	302
А.4. Производные термодинамических функций	304
Список литературы	308