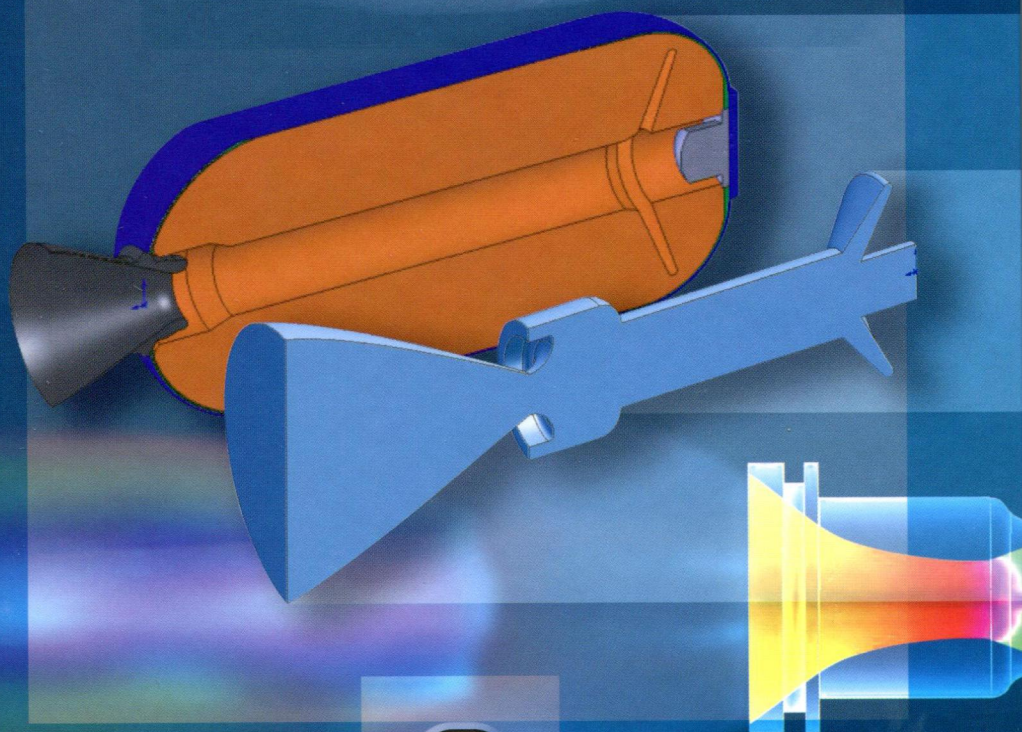


# Газовые течения в соплах энергоустановок



# **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.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . .	7
Введение . . . . .	11
Внутрикамерная газодинамика . . . . .	12
Имеющиеся публикации . . . . .	16
Список литературы . . . . .	21
<b>Глава 1. Модели и методы решения задач внутрикамерной газовой динамики . . . . .</b>	<b>23</b>
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. <b>Управление сопловыми течениями при помощи вдува</b> . . .	162
3.1. Вдув струи с поверхности плоской пластины в сверхзвуковой поток	163
3.1.1. Вдув 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. Вдув 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. Вдув 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. <b>Сопловые течения с нестационарным подводом энергии</b> . . . . .	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
<b>Глава 5. Геометрическое управление сопловыми течениями . . . . .</b>	<b>270</b>
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