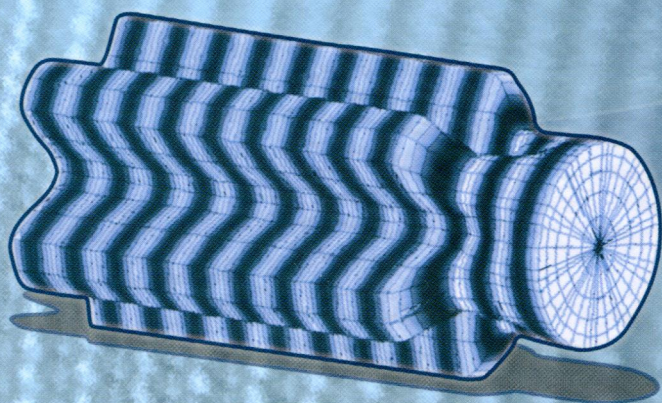


К.Н. Волков
В.Н. Емельянов

**ГАЗОВЫЕ ТЕЧЕНИЯ
С МАССОПОДВОДОМ
В КАНАЛАХ И ТРАКТАХ
ЭНЕРГОУСТАНОВОК**



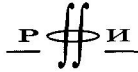
К.Н. Волков
В.Н. Емельянов

ГАЗОВЫЕ ТЕЧЕНИЯ
С МАССОПОДВОДОМ
В КАНАЛАХ И ТРАКТАХ
ЭНЕРГОУСТАНОВОК



МОСКВА
ФИЗМАТЛИТ®
2011

УДК 532.529
ББК 22.253
В 67



*Издание осуществлено при поддержке
Российского фонда фундаментальных
исследований по проекту 10-08-07062д*

Волков К.Н., Емельянов В.Н. Газовые течения с массоподводом в каналах и трактах энергоустановок. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. — 464 с. — ISBN 978-5-9221-1350-2.

Рассматриваются вопросы теоретического и численного исследования внутренней газодинамики ракетных двигателей твердого топлива. Описываются особенности построения широкого спектра математических моделей с различным уровнем схематизации явлений. Для ряда модельных задач получаются точные решения, позволяющие проводить качественный анализ течений. Разрабатываются и описываются алгоритмы решения двух- и трехмерных задач внутренней газодинамики. Приводятся результаты моделирования внутренних турбулентных течений на основе приближенных подходов, а также на основе современных технологий моделирования турбулентных течений. Обсуждаются задачи, связанные с моделированием двухфазных течений в камерах сгорания.

Монография предназначена научным работникам, специализирующимся в области вычислительной газовой динамики и теплообмена, инженерно-техническим работникам, занимающимся проектированием РДТТ, а также преподавателям, аспирантам и студентам соответствующих специальностей высших учебных заведений.

ISBN 978-5-9221-1350-2

© ФИЗМАТЛИТ, 2011

© К.Н. Волков, В.Н. Емельянов, 2011

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	7
Введение	10
Глава 1. Модели и методы решения задач внутрикамерной газодинамики	29
1.1. Построение физико-математической модели	30
1.1.1. Конструктивные схемы (30). 1.1.2. Горение твердого топлива (33). 1.1.3. Состав продуктов сгорания (35). 1.1.4. Рабочие процессы (41). 1.1.5. Внутренняя баллистика (43).	
1.2. Особенности внутренних течений	44
1.2.1. Течения в каналах со вдувом (45). 1.2.2. Эрозионное горение (48). 1.2.3. Течения в предсопловом объеме (49). 1.2.4. Сопловые течения (52). 1.2.5. Течения, наводимые органами управления (54). 1.2.6. Течения, наводимые поворотом управляющего сопла (55). 1.2.7. Течения, наводимые элементами отбора и сброса газа (57). 1.2.8. Течения в заманжетной полости (57). 1.2.9. Течения во вращающихся двигателях (58). 1.2.10. Течения в условиях действия массовых сил (58). 1.2.11. Тепловая защита (60). 1.2.12. Продольные вихревые структуры (61). 1.2.13. Сепарация частиц (63). 1.2.14. Неустойчивость рабочих процессов (64). 1.2.15. Динамика распространения послестартового облака (67). 1.2.16. Газодинамические процессы в задачах утилизации зарядов (67).	
1.3. Моделирование газодинамических процессов	70
1.3.1. Размерность модели (70). 1.3.2. Уровень физической сложности (73).	
1.4. Моделирование тепловых процессов и процессов зажигания	76
1.4.1. Суммарный тепловой поток (76). 1.4.2. Конвективная теплопередача (77). 1.4.3. Теплообмен излучением (79). 1.4.4. Кондуктивная теплопередача (81). 1.4.5. Прогрев, воспламенение и горение топлива (81).	
1.5. Моделирование изменения внутреннего объема камеры сгорания	85
1.5.1. Влияние напряженно-деформированного состояния (85). 1.5.2. Влияние условий функционирования (87).	

1.6. Моделирование акустических и колебательных процессов.	88
1.7. Основные уравнения и расчетные соотношения.	89
1.7.1. Модель вихревого течения невязкой жидкости (89).	
1.7.2. Модель вязкой жидкости (90). 1.7.3. Модель турбулентности (92).	
1.8. Методы решения газодинамических и вспомогательных задач.	100
1.8.1. Реализация модели невязкой жидкости (100). 1.8.2. Реализация модели вязкой несжимаемой жидкости (100). 1.8.3. Реализация модели вязкой сжимаемой жидкости (101). 1.8.4. Решение задачи Коши (102). 1.8.5. Построение сетки (103).	
Глава 2. Двумерные течения в каналах со вдувом.	106
2.1. Основные подходы.	107
2.1.1. Точные решения (107). 2.1.2. Полугидравлический метод (114). 2.1.3. Формулировка граничных условий (115). 2.1.4. Ламинарно-турбулентный переход (116). 2.1.5. Экспериментальные исследования (117).	
2.2. Течение в плоском и осесимметричном канале.	117
2.2.1. Распределения скорости и давления (118). 2.2.2. Кинематические характеристики течения (121). 2.2.3. Интегральные характеристики течения (123).	
2.3. Течение в канале с несимметричным вдувом.	127
2.4. Течение в кольцевом канале.	130
2.5. Структура течения во вращающемся канале.	135
2.6. Перемещение горячей поверхности канала.	141
2.6.1. Невязкое приближение (141). 2.6.2. Учет вязких эффектов (145). 2.6.3. Численные расчеты (154).	
2.7. Отклонение от симметричной формы поперечного сечения.	155
2.8. Течение в зазоре между торцом заряда и днищем двигателя.	156
2.8.1. Течение в зазоре между горящим торцом заряда и днищем (156). 2.8.2. Течение в зазоре между негорящим торцом заряда и днищем (159).	
2.9. Течение в канале с произвольным профилем скорости во входном сечении канала.	161
2.10. Течение в канале с нестационарным вдувом.	164
2.11. Сжимаемые течения в каналах со вдувом.	167
2.12. Теплообмен в канале с проницаемыми стенками.	182
2.13. Модель слоистой гидравлики.	192
2.13.1. Параболизованная модель течения (192). 2.13.2. Основные допущения (194). 2.13.3. Несжимаемая жидкость (195). 2.13.4. Упрощение интегрального уравнения (198). 2.13.5. Сжимаемая жидкость (200). 2.13.6. Численное решение интегрального уравнения (205). 2.13.7. Результаты расчетов (210).	
2.14. Акустическое поле в канале заряда.	212
2.14.1. Основные уравнения (212). 2.14.2. Поперечные колебательные моды (212). 2.14.3. Продольные колебательные моды (215).	

2.15. Линейный подход к исследованию устойчивости	217
2.16. Нестационарное течение в канале	219
2.17. Влияние турбулентности на характеристики течения в канале	224
2.17.1. Приближенный подход (224). 2.17.2. Подход, основанный на поиске подобного решения (228).	
Глава 3. Трехмерные течения в каналах со вдувом	234
3.1. Упрощенные подходы к описанию трехмерных течений	235
3.1.1. Общая характеристика (235). 3.1.2. Методы понижения размерности (236). 3.1.3. Методы возмущений (237). 3.1.4. Конструирование течений наложением особенностей (237).	
3.2. Моделирование течений в каналах звездообразной формы	238
3.3. Описание течений в переменных скорость–вихрь скорости	244
3.3.1. Преобразование уравнений (245). 3.3.2. Постановка граничных условий (248). 3.3.3. Вычислительная процедура (248). 3.3.4. Реализация граничного условия для вихря (250). 3.3.5. Расчет характеристик турбулентности (253). 3.3.6. Результаты расчетов (253).	
3.4. Моделирование течений на основе параболизованной формулировки задачи	254
3.4.1. Формулировка модели (254). 3.4.2. Детали численной реализации (257). 3.4.3. Результаты расчетов (259).	
3.5. Течение в канале с кольцевой выточкой	268
3.6. Течение жидкости в коаксиальном зазоре при наличии узлов отбора и подвода газа	277
3.7. Течение в зазоре между эксцентрично расположенными цилиндрами	281
3.8. Моделирование крупных вихрей турбулентного течения в канале со вдувом	284
3.8.1. Формулировка модели (284). 3.8.2. Параметры и сетка (285). 3.8.3. Сеточная зависимость решения (286). 3.8.4. Результаты расчетов (287).	
3.9. Нестационарные процессы	300
3.9.1. Основные подходы (300). 3.9.2. Нестационарное горение топлива (302). 3.9.3. Волновые процессы (303). 3.9.4. Ламинарные течения (306). 3.9.5. Ламинарно-турбулентный переход (308). 3.9.6. Турбулентные течения (312). 3.9.7. Крупномасштабные вихревые структуры (315). 3.9.8. Управление течениями (317).	
3.10. Выбор модели турбулентности	319
3.11. Влияние массовых сил	330
3.12. Течения во вращающихся двигателях	331
3.13. Химически реагирующие течения	334
Глава 4. Двухфазные течения	339
4.1. Движение частицы в канале со вдувом	340
4.1.1. Основные уравнения (340). 4.1.2. Точное решение для случая сильного вдува (341). 4.1.3. Результаты расчетов (347).	

4.2. Влияние массовых сил на движение частицы	351
4.2.1. Основные уравнения (351). 4.2.2. Качественный анализ (353). 4.2.3. Численные расчеты (358).	
4.3. Стохастическое моделирование движения частицы в канале	361
4.4. Влияние дисперсной фазы на характеристики турбулентности.	364
4.4.1. Обратное влияние примеси (365). 4.4.2. Математическая модель (367). 4.4.3. Результаты расчетов (370).	
4.5. Течение с химическими реакциями и горением частиц.	372
4.5.1. Построение модели (372). 4.5.2. Результаты расчетов (376).	
4.6. Изменение размера частиц	380
4.7. Дробление и коагуляция частиц в канале	383
4.7.1. Критериальные соотношения (383). 4.7.2. Результаты расчетов (387).	
4.8. Волновые явления в камере сгорания	391
4.8.1. Основные допущения (391). 4.8.2. Волновое уравнение (392). 4.8.3. Модельное уравнение (392). 4.8.4. Акустический баланс (393). 4.8.5. Вычисление интегралов (398). 4.8.6. Разворот потока (401). 4.8.7. Вклад дисперсной фазы (402). 4.8.8. Устойчивость течения (404).	
4.9. Демпфирование акустических колебаний.	406
4.9.1. Акустические, вихревые и энтропийные волны (406). 4.9.2. Механизмы взаимодействия (407). 4.9.3. Влияние горения частиц (409). 4.9.4. Теоретические решения (410). 4.9.5. Построение математической модели (413). 4.9.6. Вычислительная процедура (416). 4.9.7. Результаты расчетов (416). 4.9.8. Столкновения между частицами (422).	
4.10. Обтекание утолщенного сопла двухфазным потоком.	427
Заключение	435
1. Роль математического моделирования (435). 2. Место данной работы (436). 3. Направления развития (436).	
Список литературы	440