

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	7
Введение	10
Моделирование в механике	10
Газодинамические процессы в искусстве	12
Газодинамические процессы в природе	14
Экспериментальные наблюдения и визуальные образы	17
Формирование и развитие научной визуализации	21
Вычислительная газовая динамика	23
Экспериментальная газовая динамика	25
Развитие концепций визуального представления данных	28
Имеющиеся публикации	30
Список литературы	34
Глава 1. Методы визуализации в механике жидкости и газа	38
1.1. Математическое моделирование газодинамических процессов	39
1.2. Научная визуализация	43
1.2.1. Роль визуализации	44
1.2.2. Визуальное представление данных	45
1.2.3. Средства визуализации	46
1.2.4. Параллельные системы	47
1.3. Методы научной визуализации	48
1.4. Методы экспериментальной визуализации	51
1.4.1. Оптическая визуализация	51
1.4.2. Поверхностная визуализация	54
1.4.3. Трассирующие частицы	57
1.5. Пакеты и библиотеки	60
Глава 2. Вихревые течения (эйлерово описание)	64
2.1. Вихревые структуры	65
2.2. Обзор методов	68
2.3. Обработка скалярных и векторных полей	72
2.3.1. Скалярные поля	72
2.3.2. Векторные поля	73
2.3.3. Линии тока и траектории меченых частиц	76
2.3.4. Вихревые линии и вихревые трубки	84
2.3.5. Оператор параллельных векторов	85
2.3.6. Различные критерии	86
2.4. Методы и критерии идентификации вихрей	87
2.4.1. Метод спиральности	87
2.4.2. Метод параметра закрутки	88

2.4.3. Метод λ_2	89
2.4.4. Метод предиктора-корректора	89
2.4.5. Метод собственных векторов	90
2.4.6. Метод параллельных векторов	91
2.4.7. Метод максимальной завихренности	92
2.4.8. Метод линий тока	93
2.4.9. Комбинаторный метод	94
2.4.10. Метод минимума давления	95
2.4.11. Определение положения центра вихря	95
2.5. Критические точки	96
2.6. Шаблоны линий тока для критических точек	101
2.6.1. Двумерный случай	101
2.6.2. Трехмерный случай	102
2.6.3. Выбор шаблона	102
2.7. Предельные линии тока	107
2.8. Текстуриная визуализация	110
2.8.1. Имеющиеся подходы и их производительность	110
2.8.2. Особенности реализации	113
2.9. Применение методов визуализации в прикладных задачах	119
2.9.1. Течение в каверне с подвижной стенкой	119
2.9.2. Течение около кругового цилиндра	123
2.9.3. Течение около сферы	127
2.9.4. Обтекание профиля	131
2.9.5. Течение в дозвуковой струе	132
2.9.6. Течение в канале	134
Глава 3. Течения с газодинамическими разрывами	136
3.1. Газодинамические разрывы	137
3.2. Классификация газодинамических волн	138
3.2.1. Газодинамические признаки	138
3.2.2. Кинематические признаки	139
3.3. Обработка цифровых изображений	140
3.4. Обзор методов	142
3.5. Принципы оптической визуализации	145
3.6. Методы визуализации	147
3.6.1. Численные теневые картины	147
3.6.2. Численный шлирен	147
3.6.3. Численные интерферограммы	149
3.7. Методы выделения разрывов	150
3.7.1. Основные подходы	150
3.7.2. Извлечение разрывов	152
3.7.3. Сглаживание и подавление шума	153
3.8. Задачи с контактными границами	155
3.9. Применение методов визуализации в прикладных задачах	157
3.9.1. Течение в канале с обратным уступом	158
3.9.2. Взаимодействие ударной волны с пограничным слоем	159
3.9.3. Вдуп струи в сверхзвуковой поток	161

Глава 4. Цифровые технологии в газовой динамике	164
4.1. Обработка исходных данных	165
4.2. Сегментация изображений	166
4.3. Основные принципы	167
4.4. Методы выделения границ	169
4.4.1. Детекторы границ	169
4.4.2. Оператор Робертса	171
4.4.3. Оператор Собела	172
4.4.4. Оператор Превитта	173
4.4.5. Оператор Кирша	173
4.4.6. Оператор Робинсона	173
4.4.7. Лапласиан	173
4.4.8. Оператор Кэнни	174
4.4.9. Лапласиан гауссиана	176
4.4.10. Методы теории графов	176
4.4.11. Метод функции уровня	177
4.5. Методы связывания контура	177
4.6. Выделение разрывов	178
4.7. Условия динамической совместности и их реализация	182
4.8. Применение методов визуализации в прикладных задачах	187
4.8.1. Дифракция ударной волны на прямом угле	187
4.8.2. Рефракция ударной волны на контактном разрыве	190
Глава 5. Вихревые и двухфазные течения (лагранжево описание)	193
5.1. Методы и средства визуализации	194
5.2. Сравнение различных подходов	198
5.3. Лагранжевы когерентные структуры	200
5.4. Лагранжев подход	203
5.4.1. Пассивные частицы	203
5.4.2. Инертные частицы	207
5.5. Динамические системы и их описание	209
5.5.1. Фазовое пространство	209
5.5.2. Сечения Пуанкаре	209
5.5.3. Показатели Ляпунова	212
5.5.4. Спектр показателей Ляпунова	218
5.6. Примеры хаотической адвекции	219
5.6.1. Течение около седловой точки	219
5.6.2. Два точечных вихря	220
5.6.3. Вихрь Хилла	221
5.6.4. ABC-течение	221
5.6.5. Взаимодействие точечного вихря с нестационарным потоком	223
5.7. Численные методы для нахождения показателей Ляпунова	226
5.8. Реализация лагранжева подхода	229
5.8.1. Интегрирование уравнений	230
5.8.2. Добавление и удаление частиц	231
5.9. Подобие линий тока и траекторий	232

5.10. Особенности динамики инертных частиц	239
5.10.1. Концентрация частиц	239
5.10.2. Дисперсия частиц	240
5.10.3. Кластеризация частиц	242
5.11. Применение методов визуализации в прикладных задачах	246
5.11.1. Течение около кругового цилиндра	246
5.11.2. Течение около квадратного цилиндра	252
5.11.3. Течение около сферы	256
5.11.4. Структура вихревого кольца	258
5.11.5. Рассеивание частиц в турбулентной струе	260
5.11.6. Кластеризация частиц в канале	262
5.11.7. Взаимодействие частиц с вихревыми структурами	265
Глава 6. Визуализация сверхзвуковых течений в эксперименталь-	
ных исследованиях	267
6.1. Обтекание угла сжатия сверхзвуковым потоком	268
6.1.1. Предварительный анализ теневой картины отрывного течения в угле сжатия	268
6.1.2. Методика исследования	272
6.1.3. Результаты исследования	277
6.1.4. Обобщение результатов	291
6.2. Структура сверхзвуковой недорасширенной струи	294
6.2.1. Экспериментальное оборудование	294
6.2.2. Методики исследования	296
6.2.3. Структура течения сверхзвуковой неизобарической струи	298
6.2.4. Структура течения сверхзвуковой струи при наличии вихре- генераторов	302
6.3. Взаимодействие сверхзвуковой перерасширенной струи с наклонной преградой	311
6.3.1. Импактные струи	311
6.3.2. Экспериментальная установка	312
6.3.3. Результаты эксперимента	316
6.4. Заключение	320
Заключение	322
Список литературы	324