

ВЫСШЕЕ ОБРАЗОВАНИЕ

ЛАГРАНЖЕВЫ МОДЕЛИ ТУРБУЛЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЙ ГАЗА С ЧАСТИЦАМИ

К. Н. Волков
В. Н. Емельянов
А. С. Козелков
Е. С. Тятюшкина



E.LANBOOK.COM

**К. Н. ВОЛКОВ,
В. Н. ЕМЕЛЬЯНОВ,
А. С. КОЗЕЛКОВ,
Е. С. ТЯТЮШКИНА**

ЛАГРАНЖЕВЫ МОДЕЛИ ТУРБУЛЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЙ ГАЗА С ЧАСТИЦАМИ

Под редакцией профессора В. Н. Емельянова

Учебное пособие



ЛАНЬ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
МОСКВА
КРАСНОДАР
2022

УДК 539.1
ББК 22.383я73

Л 14 Лагранжевы модели турбулентных течений газа с частицами : учебное пособие для вузов / К. Н. Волков, В. Н. Емельянов, А. С. Козелков, Е. С. Тятюшкина ; под редакцией В. Н. Емельянова. — Санкт-Петербург : Лань, 2022. — 244 с. : ил. — Текст : непосредственный.

ISBN 978-5-8114-8548-2

Рассматриваются математические модели и приводятся результаты численного моделирования турбулентных течений газа с твердыми частицами. Обсуждаются вопросы, связанные с движением частиц, взвешенных в турбулентном потоке, и их обратным влиянием на характеристики течения несущего газа. Развиваются стохастические модели, основанные на лагранжевом подходе к описанию движения и теплообмена частиц в турбулентном потоке, а также прямое численное моделирование и моделирование крупных вихрей турбулентных течений газозвеси, включая влияние дисперсной фазы на структуру подсеточной турбулентности. Рассматриваются особенности численной реализации математических моделей двухфазных течений.

Учебное пособие предназначено для студентов старших курсов и аспирантов, специализирующихся в области механики жидкости и газа, вычислительной газовой динамики, вычислительной математики, теплофизики, аэрокосмической техники и энергомашиностроения.

УДК 539.1
ББК 22.383я73

Обложка
П. И. ПОЛЯКОВА

© Издательство «Лань», 2022
© Коллектив авторов, 2022
© Издательство «Лань»,
художественное оформление, 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	6
1. Методы моделирования течений газа с частицами	9
1.1. Методы моделирования двухфазных течений	10
1.1.1. Основные допущения	10
1.1.2. Классификация подходов	11
1.1.3. Области применения	12
1.1.4. Режимы течения	15
1.2. Континуальный подход	18
1.3. Траекторный подход	20
1.4. Кинетический подход	25
1.5. Методы описания турбулентных течений с частицами	27
1.5.1. Характеристика различных подходов	27
1.5.2. Проблема замыкания	30
1.5.3. Модели турбулентности	33
1.5.4. Влияние частиц	34
1.5.4.1. Равновесное течение	35
1.5.4.2. Замороженное течение	35
1.5.4.3. Квазиравновесное течение	35
1.5.4.4. Неравновесное течение	36
1.5.5. Столкновения частиц в турбулентном потоке	40
1.6. Вихреразрешающие подходы (эйлерово описание обеих фаз)	43
1.6.1. Методы моделирования	43
1.6.2. Операция фильтрации	47
1.6.3. Фильтрация основных уравнений	47
1.6.4. Уравнения в консервативных переменных	49
1.6.5. Модели подсеточной вязкости	51
1.6.5.1. Виды подсеточных моделей	52
1.6.5.2. Модель Смагоринского	55
1.6.5.3. Дифференциальные модели	57
1.6.5.4. Динамические модели	59
1.6.6. Оценка характерных параметров	60
1.6.7. Учет влияния дисперсной фазы	62
1.6.7.1. Градиентные соотношения	62
1.6.7.2. Метод функции плотности вероятности	66
1.7. Варианты дискретно-траекторного подхода	67
1.7.1. Детерминистический подход	67
1.7.2. Стохастический подход	68
1.7.3. Модель взаимодействия частицы с турбулентными молями	70
1.7.3.1. Влияние турбулентности	70
1.7.3.2. Взаимодействие частицы с молем	73
1.7.3.3. Сравнение различных подходов	75
1.7.3.4. Достоинства и недостатки модели	78
1.7.4. Модели, основанные на интегрировании уравнения Лапжевена	78
1.7.4.1. Безынерционные частицы	79
1.7.4.2. Инерционные частицы	82
1.7.4.3. Варианты лагранжевых моделей	83
1.8. Прямое численное моделирование (смешанное описание фаз)	87
1.8.1. Общие положения	87
1.8.2. Изотропная турбулентность	88
1.8.3. Однородная турбулентность	89
1.8.4. Неоднородная турбулентность	90

1.8.5.	Стохастическое моделирование	93
1.9.	Моделирование крупных вихрей (смешанное описание фаз)	93
1.9.1.	Общие положения	93
1.9.2.	Пренебрежение подсеточными флуктуациями	94
1.9.3.	Учет подсеточных флуктуаций	98
1.9.4.	Стохастическое моделирование	99
1.9.4.1.	Особенности реализации	99
1.9.4.2.	Неявные модели	100
1.9.4.3.	Явные модели	102
1.10.	Особенности концентрации частиц	107
1.11.	Дисперсия частиц	109
1.12.	Кластеризация частиц	111
2.	Методы реализации математических моделей	117
2.1.	Методы решения газодинамических и вспомогательных задач	118
2.1.1.	Метод конечных объемов	118
2.1.2.	Решение задачи Коши	121
2.2.	Особенности численной реализации	124
2.2.1.	Векторная форма записи	124
2.2.2.	Устойчивость вычислительной процедуры	125
2.2.3.	Особенности решения задачи Коши	126
2.2.4.	Способы инжекции частиц	128
2.2.5.	Виды траекторий	130
2.2.6.	Число частиц	130
2.2.7.	Расчет источниковых членов	131
2.2.8.	Метод трубок тока частиц	133
2.2.9.	Улучшение сходимости	134
2.2.10.	Источники ошибок	134
2.2.11.	Шаг по времени	135
2.2.12.	Уравнения в криволинейной системе координат	136
2.2.13.	Расстояние до стенки	138
2.2.14.	Параллелизация	138
2.3.	Варианты разностных схем	139
2.3.1.	Методы линеаризации	139
2.3.2.	Неявная разностная схема	141
2.3.3.	Разностные схемы, учитывающие размер частицы	142
2.3.3.1.	Метод расчета для мелких частиц	142
2.3.3.2.	Метод расчета для крупных частиц	146
2.3.4.	Разностные схемы для частных задач	147
2.3.4.1.	Движение частицы под действием силы сопротивления	147
2.3.4.2.	Схема полуаналитического интегрирования	149
2.3.4.3.	Неявная схема	149
2.3.4.4.	Полунеявная схема	149
2.3.4.5.	Схема Рунге – Кутты	150
2.3.4.6.	Учет вращения частицы	151
2.3.4.7.	Движение частицы в потоке со сдвигом	157
2.3.4.8.	Уравнения изменения температуры и массы	158
2.4.	Локализация частицы	159
2.5.	Поиск частицы	163
2.5.1.	Структурированная сетка	163
2.5.2.	Неструктурированная сетка	163
2.5.2.1.	Итеративные алгоритмы	163
2.5.2.2.	Алгоритмы направленного поиска	164
2.5.2.3.	Алгоритмы индексированного поиска	177
2.5.3.	Достоинства и недостатки некоторых алгоритмов	178
2.6.	Восполнение параметров газа	180

2.6.1.	Линейная интерполяция	180
2.6.2.	Билинейная интерполяция	180
2.6.3.	Методы высокого порядка	181
2.6.4.	Сплайн-интерполяция	181
2.6.5.	Неструктурированная сетка	181
2.6.6.	Метод взвешенных площадей	181
3.	Описание и результаты решения тестовых задач	183
3.1.	Турбулентное течение газозвеси в канале	184
3.1.1.	Математическая модель и численный метод	184
3.1.2.	Геометрия и граничные условия	185
3.1.3.	Результаты расчетов	186
3.1.3.1.	Течение чистого газа	186
3.1.3.2.	Распределение частиц	189
3.2.	Взаимодействие частиц с вихревыми структурами	193
3.2.1.	Вихревые структуры	194
3.2.2.	Математическая модель	197
3.2.2.1.	Основные соотношения	197
3.2.3.	Движение частицы	199
3.2.4.	Результаты расчетов	201
3.2.5.	Распределение скорости	201
3.2.6.	Распределение концентрации	203
3.3.	Взаимодействие ударной волны с облаком частиц	207
3.4.	Перенос частиц потоками с концентрированной завихренностью	213
3.4.1.	Типы вихревых потоков	213
3.4.2.	Силы, действующие на частицу	215
3.4.3.	Вклад различных силовых факторов	218
3.4.4.	Течение между вращающимися коаксиальными цилиндрами	220
3.4.5.	Вращательное движение жидкости над плоскостью	225
	Заключение	229
	Литература	231
	Список иллюстраций	241