

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 молеми	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