

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	10
Глава 1	
ВВОДНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ	10

Часть I

ТЕЧЕНИЯ СЖИМАЕМОГО НЕВЯЗКОГО ГАЗА И УДАРНЫЕ ВОЛНЫ

Глава 2	
ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ ГАЗОВОЙ ДИНАМИКИ	17
2.1. Уравнение непрерывности	17
2.2. Уравнение сохранения импульса	18
2.3. Субстанциональная производная и уравнение Эйлера	20
2.4. Уравнение энергии	21
2.5. Уравнение адиабатичности	23
2.6. Начальные и граничные условия	24
2.7. Идеальный газ с постоянной теплоемкостью	25
2.8. Линии тока и уравнения Бернулли для стационарного течения жидкости	26

Глава 3	
ЗВУК	29
3.1. Волновое уравнение	29
3.2. Линейные бегущие волны	31
3.3. Акустика	34
3.4. Энергия звука	36
3.5. Сферические волны	41



Глава 4

НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ОДНОМЕРНЫЕ ПЛОСКИЕ

АДИАБАТИЧЕСКИЕ ТЕЧЕНИЯ ГАЗА	44
4.1. Характеристики	44
4.2. Изэнтропическое течение. Инварианты Римана	48
4.3. Нелинейная волна, бегущая в одну сторону	51
4.4. Пример простой волны. «Перехлест»	54
4.5. Центрированная волна разрежения	57
4.6. Нестационарное истечение газа в вакуум	60
4.6.1. Сопоставление со стационарным истечением	61
4.7. Центрированная волна разрежения как пример автомодельных течений	63
4.8. Невозможность существования центрированной волны сжатия	65

Глава 5

УДАРНАЯ ВОЛНА	67
5.1. Распространение скачка сжатия в трубе с поршнем	67
5.2. Общие соотношения между газодинамическими величинами по обе стороны разрыва	69
5.3. Косые скачки уплотнения	72
5.4. Ударная адиабата	74
5.5. Ударная адиабата и скорости для ударной волны в идеальном газе с постоянной теплоемкостью	76
5.6. Закономерности ударной волны	78
5.6.1. Энтропия и толщина скачка уплотнения	78
5.6.2. Геометрическая интерпретация соотношений на ударной волне	80
5.6.3. Условия существования скачка уплотнения	83
5.7. О невозможности существования скачка разрежения в веществе с нормальными свойствами	84
5.7.1. Аномальные случаи	85
5.8. Термодинамические свойства воздуха при высоких температурах и реальные параметры сильной ударной волны	87
5.9. Распад произвольного разрыва	93
5.9.1. Примеры жизненных ситуаций с произвольными разрывами	93
5.9.2. В одну сторону может бежать только одна волна	95
5.9.3. Варианты распада	97



Глава 6	
ДЕТОНАЦИОННАЯ ВОЛНА	100
6.1. Два механизма распространения пламени	100
6.2. Детонационная адиабата	103
6.3. Качественная структура детонационной волны	107
6.4. Скорость детонации	110
6.5. Почему реализуется режим с минимальной скоростью детонации	113
6.5.1. Сверхзвуковые режимы со скоростью, превышающей минимальную	116
6.6. Пределы детонации	117
6.7. Световая детонация	118
6.7.1. Результаты и трактовка эксперимента	119
6.7.2. Светодетонационная адиабата и параметры плазмы за волной	120
6.7.3. Сверхсветодетонационный режим	123
6.8. Волна медленного горения как распространение газодинамического разрыва	124

Глава 7	
УДАРНАЯ ТРУБА И РЕЛАКСАЦИОННЫЙ СЛОЙ В УДАРНОЙ ВОЛНЕ	127
7.1. Газодинамический процесс в ударной трубе. Падающая ударная волна	127
7.1.1. Расчеты и оценки параметров ударной волны	129
7.1.2. Влияние неидеальности процесса	133
7.2. Отражение ударной волны от торца ударной трубы	135
7.3. Набегание на стенку потока холодного газа	137
7.3.1. Гидравлический удар	139
7.4. Релаксационный слой во фронте ударной волны	141
7.4.1. Качественная картина	141
7.4.2. Газодинамические уравнения в слое и его структура	144
7.5. Пример расчета структуры релаксационного слоя в ударной волне	146
7.6. Измерение времени колебательной релаксации	150

Глава 8	
СИЛЬНЫЙ ВЗРЫВ	152
8.1. Постановка автомодельной задачи и закон распространения ударной волны	152



8.2. Решение автомодельной задачи	156
8.3. Результаты решения и их физическая интерпретация	161
8.4. От атомного взрыва до лазерной искры	163
8.5. Приближенное рассмотрение сильного взрыва	166
8.6. Заключительная стадия сильного взрыва: действие противодавления	168
8.7. Почему автомодельное решение неприменимо к взрыву обычного взрывчатого вещества	171
Глава 9	
РАЗЛЕТ ГАЗОВОГО ШАРА В ПУСТОТУ	174
9.1. Асимптотическое движение газа	175
9.2. Эффект закалки	178
9.3. Взрыв на большой высоте	180
Глава 10	
ИСТЕЧЕНИЕ ГАЗА ЧЕРЕЗ НАСАДКИ И СОПЛА	182
10.1. Квазиодномерное стационарное течение газа по трубе переменного сечения	183
10.2. Истечение через насадку	186
10.3. Сопло Лаваля	187
10.4. Реактивная сила	190
Глава 11	
ДВИЖЕНИЕ ТЕЛ В АТМОСФЕРЕ С ДОЗВУКОВОЙ И СВЕРХЗВУКОВОЙ СКОРОСТЯМИ	192
11.1. Распространение малых возмущений в потоке	192
11.2. Метод Теплера фотографирования газовых течений	195
11.2.1. Распространение света в неоднородном газе	196
11.2.2. Схемы прибора Теплера и современного устройства	200
11.3. Обтекание затупленного тела гиперзвуковым потоком газа	202
11.3.1. Лабораторный эксперимент	204
11.3.2. Численное моделирование и теоретические оценки	207
11.3.3. Сила и коэффициент сопротивления при гиперзвуковом полете тела	210
11.3.4. О неравновесности воздуха за ударной волной при гиперзвуковом движении тел в сильно разреженной атмосфере	211



Часть II

ДИНАМИКА НЕСЖИМАЕМОЙ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ

Глава 12

ПОНЯТИЯ О ВЯЗКОСТИ И НЕКОТОРЫЕ ПРОСТЫЕ ТЕЧЕНИЯ

ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ	215
12.1. Молекулярно-кинетический механизм газового давления	216
12.2. Молекулярный механизм внутреннего трения газа в случае чисто сдвигового течения	219
12.3. Гидродинамика чисто сдвигового течения и силы, действующие на пластины	224
12.4. Тензор вязких напряжений	227
12.5. Уравнение движения вязкой жидкости	234
12.6. Молекулярный механизм теплопроводности газа	236
12.7. Диссипация энергии в газе и жидкости	238
12.7.1. Диссипация в газе	238
12.7.2. Диссипация энергии в несжимаемой жидкости	241
12.8. Структура скачка уплотнения в ударной волне	243
12.9. Течение несжимаемой вязкой жидкости по каналу и трубе	251
12.10. Число Рейнольдса и закон подобия	256
12.11. Обтекание сферы вязкой жидкостью при малых числах Рейнольдса	260
12.11.1. Физическая оценка силы сопротивления	261
12.11.2. Точное решение уравнений (12.79)	265
12.11.3. Сила сопротивления	269
12.11.4. Линии тока	271
12.11.5. Пределы справедливости и точность формулы Стокса	273

Глава 13

ПОТЕНЦИАЛЬНОЕ И ВИХРЕВОЕ ТЕЧЕНИЯ

13.1. Завихренность жидкости и циркуляция скорости	274
13.2. Примеры вихревого движения жидкости	276
13.2.1. Вращение сосуда с жидкостью	276
13.2.2. Сдвиговое течение	277
13.2.3. Медленное обтекание шара	278
13.3. Сохранение циркуляции скорости в идеальной жидкости	279
13.4. Справедливость уравнений Бернулли для потенциального и вихревого течений идеальной жидкости	282
13.5. Потенциальное течение при движении шара в несжимаемой жидкости	284



13.5.1. Шар движется, жидкость на бесконечности неподвижна	285
13.5.2. На покоящийся шар набегают поток жидкости	288
13.6. Парадокс Даламбера: отсутствие сопротивления при потенциальном обтекании тела	290
13.7. Линии и функции тока при плоском стационарном течении несжимаемой жидкости	293
Глава 14 ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ И ЯВЛЕНИЕ ОТРЫВА	299
14.1. Приближенные уравнения ламинарного пограничного слоя	300
14.2. Пограничный слой у полубесконечной пластины, обтекаемой параллельным ей потоком	304
14.3. Отрыв линий тока от обтекаемого тела	312
14.4. Неустойчивость тангенциальных разрывов	317
14.5. Коэффициенты лобового сопротивления в большом диапазоне чисел Рейнольдса	321
14.6. Подъемная сила	325
14.6.1. Простейшая оценка подъемной силы	326
14.6.2. Теорема Жуковского	329
Глава 15 ТУРБУЛЕНТНОСТЬ	335
15.1. Историческое введение и некоторые существенные факты	336
15.2. Турбулентные напряжения	342
15.3. Турбулентная вязкость	344
15.4. Профиль скоростей при турбулентном течении жидкости вдоль неподвижной стенки	348
15.4.1. Гладкая стенка	348
15.4.2. Шероховатая стенка	354
15.5. Сила сопротивления при турбулентном течении жидкости по трубе	355
15.5.1. Гладкие трубы	356
15.5.2. Коэффициент сопротивления для гладкой трубы	358
15.5.3. Шероховатые трубы	359
15.6. Баланс энергии и ее превращения при турбулентном движении несжимаемой жидкости	362
15.6.1. Уравнение баланса истинной кинетической энергии	363
15.6.2. Баланс энергии осредненного движения	364
15.6.3. Баланс энергии турбулентных пульсаций	367
15.7. Диссипация энергии при турбулентном течении несжимаемой жидкости вдоль плоской стенки	370
15.7.1. Численная оценка диссипации	375



15.8. Закон подобия и энергетический спектр пульсаций при развитой турбулентности	377
15.8.1. Энергетический спектр	380
Глава 16 КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН И МЕДЛЕННОЕ ГОРЕНИЕ	383
16.1. Уравнение переноса тепла	384
16.2. Теплообмен между нагретым телом и неподвижной средой	388
16.3. Теплопередача в быстром ламинарном потоке	390
16.4. Турбулентные теплопроводность и теплообмен	393
16.5. Распространение пламени в режиме медленного горения	397
16.5.1. Структура волны медленного горения	397
16.5.2. Упрощенное уравнение режима	400
16.5.3. Нормальная скорость волны медленного горения	403
16.5.4. Распределение температуры в зоне прогрева и толщина волны	408
16.6. Распространение газовых разрядов в режиме медленного горения	409
16.6.1. Тенденция разрядов к распространению и аналогия с медленным горением	410
16.6.2. Примеры медленного распространения разрядов	413
16.6.3. Нормальная скорость распространения разряда	417
16.6.4. Течение в высокочастотном плазмотроне	420
16.6.5. Дозвуковое обтекание горячей газовой сферы потоком холодного газа и скорость движения оптического разряда	422
Литература	430