

В. М. ФОМИН
В. И. ЯКОВЛЕВ

**ЭНЕРГООБМЕН
В СВЕРХЗВУКОВЫХ
ГАЗОПЛАЗМЕННЫХ ТЕЧЕНИЯХ
С УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ**



В. М. ФОМИН
В. И. ЯКОВЛЕВ

**ЭНЕРГООБМЕН
В СВЕРХЗВУКОВЫХ
ГАЗОПЛАЗМЕННЫХ ТЕЧЕНИЯХ
С УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ**



МОСКВА
ФИЗМАТЛИТ®
2017

УДК 533
ББК 22.333
Ф 76

Фомин В.М., Яковлев В.И. Энергообмен в сверхзвуковых газоплазменных течениях с ударными волнами. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2017. — 368 с. — ISBN 978-5-9221-1721-0.

В книге содержатся обзор, анализ и обобщение результатов расчетно-экспериментальных исследований ударных волн в газоразрядной плазме, ионизирующих ударных волн в газе, а также ударно-волновой структуры сверхзвукового потока с оптическим пульсирующим разрядом. Особое внимание уделяется важной как в научном, так и в практическом отношении задаче об относительной роли плазменных и тепловых механизмов воздействия на структуру ударно-волновых течений. Рассматриваются фундаментальные вопросы структурной неустойчивости ионизирующих ударных волн; на основе нетрадиционного подхода с учетом межчастичного энергообмена в неравновесной плазме выявлены возможные механизмы данного явления. Подробно решается задача о формировании квазистационарной ударно-волновой структуры в сверхзвуковом потоке с различной динамикой пульсирующей лазерной плазмы в режимах лазерной искры и светодетонационной волны.

Книга предназначена научным и инженерно-техническим работникам, аспирантам, студентам, специализирующимся в области физики ударных волн и плазменной аэрогазодинамики.

ISBN 978-5-9221-1721-0

© ФИЗМАТЛИТ, 2017

© В. М. Фомин, В. И. Яковлев, 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
Глава 1. Ударные волны в неоднородной газоплазменной среде и структура сверхзвуковых течений	10
1.1. К истории вопроса	10
1.1.1. Ударные волны в неоднородной среде	10
1.1.2. Динамика УВ в релаксирующем газе	21
1.2. Структура ударных волн в плазме: теоретические результаты	34
1.2.1. Влияние степени ионизации	34
1.2.2. Электрическое поле поляризации за фронтом УВ в неизотермической плазме	49
1.2.3. УВ в газоразрядной плазме (с внешним электрическим полем)	61
1.3. Тепловые и плазменные эффекты в динамике ударных волн и структуре сверхзвуковых течений	68
1.3.1. Экспериментальные исследования	68
1.3.2. Эффекты тепловыделения	84
1.3.3. Плазменные механизмы энергообмена	86
1.4. Перспективы и направления дальнейших исследований	95
Список литературы к введению и главе 1	100
Глава 2. Ионизирующие ударные волны в атомарных газах	110
2.1. Устойчивые режимы течения	111
2.1.1. Ионизационная релаксация	111
2.1.2. Область течения равновесной плазмы	123
2.1.3. Роль излучения плазмы	127
2.2. Неустойчивость ионизирующих ударных волн	137
2.2.1. Феноменология явления	137
2.2.2. Вопросы гидродинамической устойчивости ударных волн	142
2.2.3. Модели структурной неустойчивости УВ	146
2.2.4. Рабочие параметры экспериментальных исследований	165
Глава 3. Методы и результаты исследований ионизирующих УВ	170
3.1. Экспериментальная установка и методы ИК-диагностики	171
3.1.1. Краткое описание установки	171
3.1.2. Результаты измерений	174
3.2. Течение равновесной плазмы	183
3.2.1. Ионизационное равновесие: влияние диссипативных процессов	183

3.2.2. Интегральные радиационные потери аргоновой плазмы . . .	195
3.3. Ионизация и энергообмен в области лавинной ионизации.	199
3.3.1. Время ионизационной релаксации	199
3.3.2. Источник электронов и скорость лавинной ионизации . . .	205
3.3.3. Уравнение энергии электронов: механизмы и характерные частоты	231
3.3.4. Электрофизические параметры плазмы аргона за фронтом УВ	250
3.3.5. О структурной неустойчивости УВ в атомарных газах . . .	259
Список литературы к главам 2 и 3	274
Глава 4. Лазерный (оптический) разряд в сверхзвуковом потоке	284
4.1. Гидродинамика лазерного пробоя в газе.	284
4.1.1. Лазерная искра: результаты экспериментов	286
4.1.2. Модель точечного взрыва с учетом противодействия	293
4.1.3. Режим световой детонации	304
4.2. Пульсирующий оптический разряд в сверхзвуковом потоке. . . .	319
4.2.1. Расчет структуры течения на основе модели сильного взрыва	319
4.2.2. Результаты экспериментов	323
4.2.3. Условие квазистационарности течения	333
4.3. Лазерный разряд в сверхзвуковом потоке: гидродинамические модели	337
4.3.1. Лазерная искра в сверхзвуковом потоке	337
4.3.2. Энергопоглощение за фронтом светодетонационной волны	343
4.3.3. Эффекты энерговыделения: сравнительный анализ волновой структуры и параметров квазистационарного течения	353
Список литературы к главе 4	361