

Я. Б. ЗЕЛЬДОВИЧ и Ю. П. РАЙЗЕР

ФИЗИКА УДАРНЫХ ВОЛН
И ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ
ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ
ЯВЛЕНИЙ



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
МОСКВА 1963

530. I
3 50
УДК 541.12

АННОТАЦИЯ

Книга представляет собой первую в мировой литературе попытку систематического рассмотрения обширного круга вопросов из различных областей физики, физической химии, астрофизики, с которыми имеет дело современная газо- и гидродинамика. В ней излагаются основы газовой динамики и теория ударных волн, теория переноса излучения. Изучаются термодинамические и оптические свойства вещества при высоких температурах и давлениях, кинетика диссоциации, ионизации и других неравновесных процессов, явления, связанные с излучением света и лучистым теплообменом в ударных волнах и при взрывах, вопросы распространения ударных волн в твердых телах и т. д. Авторам монографии принадлежит большое число оригинальных работ в рассматриваемой области науки, которые нашли свое отражение в книге.

Книга послужит ценным практическим пособием для широких кругов физиков, механиков и инженеров, занимающихся прикладной физикой и новой техникой. Она будет полезна студентам и аспирантам соответствующих специальностей, а также всем физикам и механикам, желающим познакомиться с современным состоянием науки об ударных волнах.

Яков Борисович Зельдович и Юрий Петрович Райзер.

Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений.

М., Физматгиз, 1963 г., 632 стр. с илл.

Редактор Т. К. Бреус.

Техн. редактор К. Ф. Брудно.

Корректор Е. А. Великая.

Сдано в набор 19/V 1963 г. Подписано к печати 9/X 1963 г. Бумага 70×108^{1/16}.
Физ. печ. л. 39,5. Условн. печ. л. 54,12. Уч.-пзд. л. 52,95. Тираж 4000 экз. Т-13905.
Цена книги 2 р. 85 к. Заказ № 818.

Государственное издательство физико-математической литературы.
Москва, В-71, Ленинский проспект, 15

Московская типография № 5 Мосгоссовнархоза. Москва, Трехпрудный пер., 9.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	9
-----------------------	---

Глава I

ЭЛЕМЕНТЫ ГАЗОДИНАМИКИ И КЛАССИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ УДАРНЫХ ВОЛН

1. Непрерывное течение невязкого и нетеплопроводного газа	11
§ 1. Уравнения газовой динамики (11). § 2. Лагранжевы координаты (14). § 3. Звуковые волны (16). § 4. Сферические звуковые волны (21). § 5. Ха- рактеристики (22). § 6. Плоское изэнтропическое течение. Инварианты Римана (25). § 7. Плоское изэнтропическое течение газа в ограниченном пространстве (29). § 8. Простые волны (31). § 9. Искажения профилей в бегущей волне конечной амплитуды. Некоторые свойства простых волн (33). § 10. Волна разрежения (35). § 11. Центрированная волна разреже- ния как пример автомодельного движения газа (39). § 12. О невозмож- ности существования центрированной волны сжатия (43).	
2. Ударные волны	45
§ 13. Введение в газодинамику понятия об ударной волне (45). § 14. Ударная адиабата (48). § 15. Ударные волны в идеальном газе с постоянной тепло- емкостью (49). § 16. Геометрическая интерпретация закономерностей ударного сжатия (52). § 17. Невозможность существования ударной волны разрежения в веществе с нормальными свойствами (56). § 18. Ударные волны слабой интенсивности (58). § 19. Ударные волны в веществе с ано- мальными термодинамическими свойствами (62).	
3. Вязкость и теплопроводность в газодинамике	64
§ 20. Уравнения одномерного движения газа (64). § 21. Замечания о второй вязкости (66). § 22. Замечания о поглощении звука (67). § 23. Структура и ширина фронта ударной волны слабой интенсивности (68).	
4. Некоторые задачи	75
§ 24. Распространение произвольного разрыва (75). § 25. Сильный взрыв в од- нородной атмосфере (81). § 26. Приближенное рассмотрение сильного взрыва (85). § 27. Замечания о точечном взрыве с учетом противодавления (86). § 28. Сильный взрыв в неоднородной атмосфере (88). § 29. Адиа- батический разлет в пустоту газового шара (90). § 30. Автомодельные режимы разлета шара в пустоту (92).	

Глава II

ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ И ЛУЧИСТЫЙ ТЕПЛООБМЕН В СРЕДЕ

§ 1. Введение и основные понятия (95). § 2. Механизмы испускания, поглощения и рассеяния света в газах (98). § 3. Равновесное излучение и абсолютно черное тело (102). § 4. Вынужденное испускание (104). § 5. Урав- нение переноса излучения (107). § 6. Интегральное выражение для интен- сивности излучения (109). § 7. Излучение плоского слоя (111). § 8. Эффек- тивная или яркостная температура поверхности неравномерно нагретого тела (115). § 9. Движение вещества с учетом лучистого теплообмена (118).

§ 10. Диффузионное приближение (121). § 11. Приближение «вперед — назад» (125). § 12. Локальное равновесие и приближение лучистой теплопроводности (126). § 13. Взаимоотношение диффузионного приближения и приближения лучистой теплопроводности (128). § 14. Лучистое равновесие в звездных фотосферах (131). § 15. Решение задачи о плоской фотосфере (134). § 16. Потери энергии нагретого тела на излучение (137). § 17. Уравнения гидродинамики с учетом энергии и давления излучения и лучистого теплообмена (140).

Глава III

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГАЗОВ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

1. Газ из невзаимодействующих частиц 144
 § 1. Идеальный газ с постоянной теплоемкостью и неизменным числом частиц (144). § 2. Расчеты термодинамических функций методом статистических сумм (147). § 3. Диссоциация двухатомных молекул (150). § 4. Химические реакции (155). § 5. Ионизация и электронное возбуждение (158). § 6. Электронная статистическая сумма и роль энергии возбуждения атомов (163). § 7. Приближенный метод расчета в области многократной ионизации (166). § 8. Интерполяционные формулы и эффективный показатель адиабаты (171). § 9. Ударная адиабата в условиях диссоциации и ионизации (173). § 10. Ударная адиабата с учетом равновесного излучения (176).
2. Газ из частиц с кулоновским взаимодействием 178
 § 11. Разреженный ионизованный газ (178). § 12. Плотный газ. Элементы квантовой статистики Ферми—Дирака для электронного газа (181). § 13. Модель атома по Томасу—Ферми и сильное сжатие холодного вещества (184). § 14. Вычисление термодинамических функций высоконагретого плотного газа методом Томаса—Ферми (190).

Глава IV

УДАРНЫЕ ТРУБЫ

§ 1. Использование ударной трубы для изучения физико-химической кинетики (193). § 2. Принцип действия (194). § 3. Элементарная теория ударной трубы (195). § 4. Электромагнитные ударные трубки (198). § 5. Методы измерений различных величин (201).

Глава V

ПОГЛОЩЕНИЕ И ИСПУСКАНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ В ГАЗАХ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

- § 1. Введение. Типы электронных переходов (204).
1. Непрерывный спектр 206
 § 2. Тормозное излучение электрона в кулоновском поле иона (206). § 3. Свободно-свободные переходы в нагретом ионизованном газе (211). § 4. Эффективное сечение захвата электрона ионом с испускаемым квантом (214). § 5. Эффективное сечение связанно-свободного поглощения света атомами и ионами (216). § 6. Коэффициент непрерывного поглощения в газе из водородоподобных атомов (220). § 7. Непрерывное поглощение света в одноатомном газе в области первой ионизации (223). § 8. Средние пробеги излучения при многократной ионизации атомов газа (227).
2. Линейчатый спектр атомов 232
 § 9. Классическая теория спектральных линий (232). § 10. Квантовая теория спектральных линий. Силы осцилляторов (235). § 11. Спектр поглощения водородоподобных атомов (239). § 12. Силы осцилляторов для континуума. Теорема сумм (242). § 13. Замечания об энергетической роли линий в излучении нагретого тела и лучистом переносе энергии (244).

3. Полосатый спектр молекул	246
§ 14. Энергетические уровни двухатомных молекул (246). § 15. Структура молекулярных спектров (250). § 16. Принцип Франка—Кондона (253). § 17. Вероятности молекулярных переходов с испусканием света (255). § 18. Коэффициент поглощения света в линиях (260). § 19. Молекулярное поглощение при высоких температурах (262). § 20. Уточненный расчет коэффициента молекулярного поглощения при высоких температурах (264).	
4. Воздух	268
§ 21. Оптические свойства нагретого воздуха (268).	

Глава VI

СКОРОСТИ РЕЛАКСАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ГАЗАХ

1. Молекулярные газы	275
§ 1. Установление термодинамического равновесия (275). § 2. Возбуждение вращений молекул (278). § 3. Уравнение кинетики для релаксации колебательной энергии молекул (279). § 4. Вероятность возбуждения колебаний и время релаксации (281). § 5. Уравнение кинетики диссоциации двухатомных молекул и время релаксации (285). § 6. Скорости рекомбинации атомов и диссоциации двухатомных молекул (287). § 7. Химические реакции и метод активированного комплекса (290). § 8. Реакция окисления азота (295). § 9. Скорость образования двуокиси азота при высоких температурах (299).	
2. Ионизация и электронное возбуждение	301
§ 10. Основные механизмы (301). § 11. Ионизация электронным ударом (304). § 12. Возбуждение атомов электронным ударом (307). § 13. Ионизация и возбуждение ударами тяжелых частиц (309). § 14. Ионизация и возбуждение световыми квантами (312). § 15. Ионизация и рекомбинация в молекулярных газах (в воздухе) (316).	
3. Плазма	317
§ 16. Релаксация в плазме (317).	

Глава VII

СТРУКТУРА ФРОНТА УДАРНЫХ ВОЛН В ГАЗАХ

§ 1. Введение (321).	
1. Скачок уплотнения	324
§ 2. Вязкий скачок уплотнения (324). § 3. Роли вязкости и теплопроводности в образовании скачка уплотнения (330). § 4. Диффузия в бинарной смеси газов (334). § 5. Диффузия в ударной волне, распространяющейся по бинарной смеси (336).	
2. Релаксационный слой	339
§ 6. Ударные волны в газе с замедленным возбуждением некоторых степеней свободы (339). § 7. Возбуждение молекулярных колебаний (343). § 8. Диссоциация двухатомных молекул (347). § 9. Ударные волны в воздухе (350). § 10. Ионизация в ударной волне (теория) (352). § 11. Ионизация в ударной волне (экспериментальные результаты; замечания о начальной ионизации; воздух) (357). § 12. Ударные волны в плазме (359). § 13. Поляризация плазмы и возникновение электрического поля в ударной волне (364).	
3. Лучистый теплообмен во фронте ударной волны	367
§ 14. Качественная картина (367). § 15. Приближенная формулировка задачи о структуре фронта (371). § 16. Ударная волна докритической амплитуды (374). § 17. Ударная волна сверхкритической амплитуды (377). § 18. Ударная волна при больших плотностях энергии и давлении излучения (380).	

Глава VIII

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ КИНЕТИКА В ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

- | | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 1. Динамика неравновесного газа. | 383 |
| § 1. Уравнения газовой динамики при отсутствии термодинамического равновесия (383). § 2. Возрастание энтропии (386). § 3. Аномальные дисперсия и поглощение ультразвука (388). § 4. Закон дисперсии и коэффициент поглощения ультразвука (392). | |
| 2. Химические реакции. | 397 |
| § 5. Окисление азота при сильном взрыве в воздухе (397). | |
| 3. Нарушение термодинамического равновесия при разлете газа в пустоту | 402 |
| § 6. Разлет газового облака (402). § 7. Эффект «закалки» (404). § 8. Остаточная ионизация (406). § 9. Замечания о плоском разлете и об истечении газа в пустоту (409). | |
| 4. Конденсация паров при адиабатическом расширении | 411 |
| § 10. Насыщение паров и возникновение центров конденсации (411). § 11. Термодинамика и кинетика процесса конденсации (413). § 12. Конденсация в облаке испаренного вещества, разлетающегося в пустоту (415). § 13. К вопросу о механизме образования космической пыли. Замечания о лабораторном исследовании конденсации (419). | |

Глава IX

СВЕТОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ В УДАРНЫХ ВОЛНАХ И ПРИ СИЛЬНОМ ВЗРЫВЕ В ВОЗДУХЕ

- | | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 1. Яркость фронта ударных волн большой амплитуды в газах | 421 |
| § 1. Качественная зависимость яркостной температуры от истинной температуры за фронтом (421). § 2. Поглощение световых квантов в холодном воздухе (425). § 3. Максимальная яркостная температура для воздуха (427). § 4. Предельная яркость очень сильной волны в воздухе (429). | |
| 2. Оптические явления, наблюдаемые при сильном взрыве, и охлаждение воздуха излучением. | 431 |
| § 5. Общее описание световых явлений (431). § 6. Отрыв фронта ударной волны от границы огненного шара (436). § 7. Эффект минимума яркости огненного шара (439). § 8. Охлаждение воздуха излучением (442). § 9. Возникновение температурного уступа — волны охлаждения (444). § 10. Энергетический баланс и скорость распространения волны охлаждения (446). § 11. Стягивание волны охлаждения к центру (449). | |
| 3. Структура фронта волны охлаждения | 451 |
| § 12. Постановка задачи (451). § 13. Поток излучения с поверхности фронта волны (454). § 14. Распределение температуры во фронте сильной волны (457). § 15. Учет адиабатического охлаждения (459). | |

Глава X

ТЕПЛОВЫЕ ВОЛНЫ

- | | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| § 1. Теплопроводность вещества (462). § 2. Нелинейная (лучистая) теплопроводность (463). § 3. Особенности распространения тепла при линейной и нелинейной теплопроводностях (466). § 4. Закон распространения тепловой волны от мгновенного плоского источника (471). § 5. Автомодельная тепловая волна от мгновенного плоского источника (472). § 6. Распространение тепла от мгновенного точечного источника (476). § 7. Некоторые автомодельные | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|

плоские задачи (479). § 8. Замечания о проникновении тепла в среду при учете движения (482). § 9. Автомодельное решение как предельное решение неавтомодельной задачи (484). § 10. О переносе тепла неравновесным излучением (486).

Глава XI

УДАРНЫЕ ВОЛНЫ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ

§ 1. Введение (489).

- | | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 1. Термодинамические свойства твердых тел при высоких давлениях и температурах | 492 |
| § 2. Сжатие холодного вещества (492). § 3. Тепловое движение атомов (496). | |
| § 4. Уравнение состояния тела, атомы которого совершают малые колебания (498). § 5. Тепловое возбуждение электронов (502). § 6. Трехчленное уравнение состояния (504). | |
| 2. Ударная адиабата. | 505 |
| § 7. Ударная адиабата конденсированного вещества (505). § 8. Аналитические представления ударной адиабаты (508). § 9. Ударные волны слабой интенсивности (509). § 10. Ударное сжатие пористого вещества (510). § 11. Выход не очень сильной ударной волны на свободную поверхность тела (513). § 12. Экспериментальные методы отыскания ударной адиабаты твердых тел (518). § 13. Извлечение кривой холодного сжатия из результатов опытов по ударному сжатию (524). | |
| 3. Акустические волны и расщепление волн | 526 |
| § 14. Статическая деформация твердого тела (526). § 15. Переход твердого тела в текучее состояние (529). § 16. Скорость распространения акустических волн (533). § 17. Расщепление волн сжатия и разгрузки (535). § 18. Измерение скорости звука в веществе, сжатом ударной волной (536). § 19. Фазовые превращения и расщепление ударных волн (540). § 20. Ударная волна разрежения в среде, испытывающей фазовый переход (544). | |
| 4. Явления при выходе мощной ударной волны на свободную поверхность тела. | 548 |
| § 21. Предельные случаи твердого и газообразного состояний разгруженного вещества (548). § 22. Критерий полного испарения вещества при разгрузке (550). § 23. Опытное определение температуры и энтропии в мощной ударной волне при помощи исследования разгруженного вещества в газовой фазе (554). § 24. Свечение паров металла при разгрузке (556). § 25. Замечание о принципиальной возможности измерения энтропии в ударной волне по свечению при разгрузке (560). | |
| 5. Некоторые другие явления. | 561 |
| § 26. Электропроводность неметаллических тел в ударных волнах (561). § 27. Измерение показателя преломления вещества, сжатого в ударной волне (563). | |

Глава XII

НЕКОТОРЫЕ АВТОМОДЕЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ГАЗОВОЙ ДИНАМИКЕ

- | | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 1. Введение. | 566 |
| § 1. Группы преобразований, допускаемые уравнениями газовой динамики (566). | |
| § 2. Автомодельные движения (568). § 3. Условия автомодельности движения (570). § 4. Два типа автомодельных решений (572). | |
| 2. Схождение к центру сферической ударной волны и захлопывание пузырьков в жидкости | 574 |
| § 5. Постановка задачи о сходящейся ударной волне (574). § 6. Основные уравнения (575). § 7. Исследование уравнений (577). § 8. Результаты решения (581). § 9. Захлопывание пузырьков. Задача Рэля (584). § 10. Захлопывание пузырьков. Учет сжимаемости и вязкости (587). | |

3. Выход ударной волны на поверхность звезды	588
§ 11. Распространение ударной волны при степенном законе уменьшения плотности (588). § 12. К вопросу о вспышках сверхновых звезд и происхождении космических лучей (592).	
4. Движение газа под действием кратковременного удара	595
§ 13. Постановка задачи и общий характер движения (595). § 14. Автомодельное решение и законы сохранения энергии и импульса (597). § 15. Решение уравнений (600). § 16. Ограничение показателя автомодельности законами сохранения импульса и энергии (604). § 17. Выход неавтомодельного движения на предельный режим и «бесконечность» энергии в автомодельном решении (605). § 18. Сосредоточенный удар по поверхности газа (взрыв на поверхности) (609). § 19. Результаты упрощенного рассмотрения автомодельного движения при сосредоточенном и нитевом ударах (612). § 20. Удар при падении очень быстрого метеорита на поверхность планеты (614). § 21. Сильный взрыв в неограниченной пористой среде (615). § 22. Автомодельное движение в неоднородной атмосфере, вызванное кратковременным плоским ударом (617). § 23. О распространении ударной волны вниз при взрыве в неоднородной атмосфере (621).	
Литература.	623