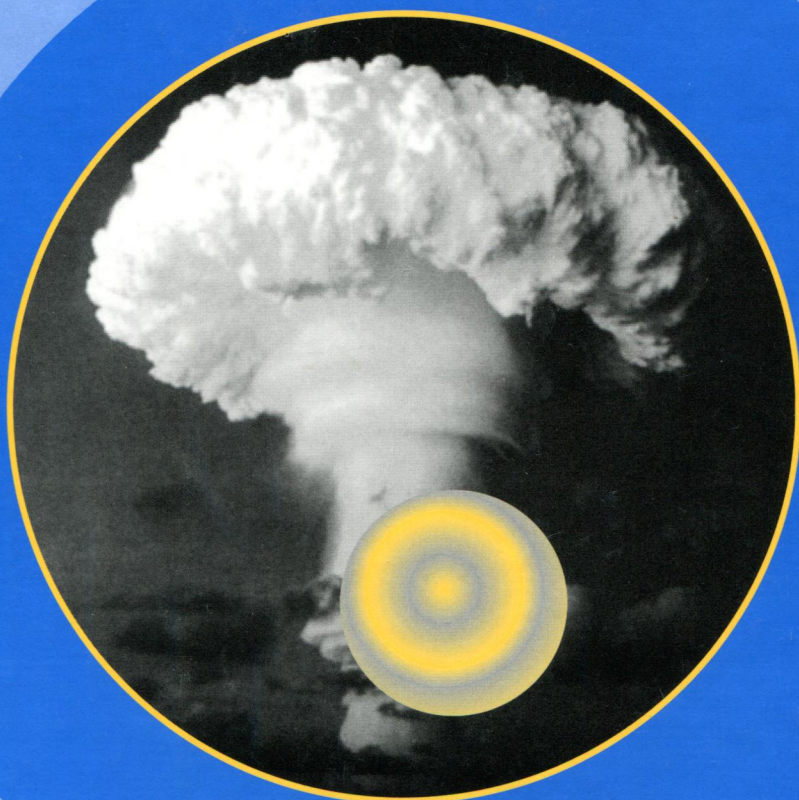


# ФИЗИКА УДАРНЫХ ВОЛН И ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ

Я.Б. ЗЕЛЬДОВИЧ  
Ю.П. РАЙЗЕР



ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ и ПРИКЛАДНАЯ ФИЗИКА

---

Я.Б. ЗЕЛЬДОВИЧ и Ю.П. РАЙЗЕР

ФИЗИКА УДАРНЫХ ВОЛН  
И ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ  
ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ  
ЯВЛЕНИЙ

Издание третье, исправленное



МОСКВА  
ФИЗМАТЛИТ®  
2008

УДК 541.12  
ББК 30.13  
3 50

Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. **Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений.** — 3-е изд., исправл. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. — 656 с. — ISBN 978-5-9221-0938-3.

В книге рассматривается обширный круг вопросов из различных областей физики, физической химии, астрофизики, с которыми имеет дело газо- и гидродинамика. Излагаются основы газовой динамики и теория ударных волн, теория переноса излучения. Рассматриваются 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 основами науки об ударных волнах.

ISBN 978-5-9221-0938-3

© ФИЗМАТЛИТ, 2008

© Я.Б. Зельдович, Ю.П. Райзер, 2008

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие к третьему изданию . . . . .	8
Предисловие ко второму изданию . . . . .	9
Предисловие к первому изданию . . . . .	10
<b>Глава I. Элементы газодинамики и классическая теория ударных волн . . . . .</b>	<b>12</b>
1. Непрерывное течение невязкого и нетеплопроводного газа . . . . .	12
§ 1. Уравнения газовой динамики (12). § 2. Лагранжевы координаты (15). § 3. Звуковые волны (17). § 4. Сферические звуковые волны (22). § 5. Характе- ристики (23). § 6. Плоское изэнтропическое течение. Инварианты Римана (27). § 7. Плоское изэнтропическое течение газа в ограниченном пространстве (30). § 8. Простые волны (32). § 9. Искажение профилей в бегущей волне конечной амплитуды. Некоторые свойства простых волн (34). § 10. Волна разрежения (37). § 11. Центрированная волна разрежения как пример автомодельного движения газа (41). § 12. О невозможности существования центрированной волны сжатия (45).	
2. Ударные волны . . . . .	46
§ 13. Введение в газодинамику понятия об ударной волне (46). § 14. Ударная адиабата (49). § 15. Ударные волны в идеальном газе с постоянной теплоемко- стью (50). § 16. Геометрическая интерпретация закономерностей ударного сжа- тия (54). § 17. Невозможность существования ударной волны разрежения в ве- ществе с нормальными свойствами (57). § 18. Ударные волны слабой интенсив- ности (60). § 19. Ударные волны в веществе с аномальными термодинамическими свойствами (63).	
3. Вязкость и теплопроводность в газодинамике . . . . .	65
§ 20. Уравнения одномерного движения газа (65). § 21. Замечания о второй вяз- кости (67). § 22. Замечания о поглощении звука (68). § 23. Структура и ширина фронта ударной волны слабой интенсивности (69).	
4. Некоторые задачи . . . . .	76
§ 24. Распространение произвольного разрыва (76). § 25. Сильный взрыв в одно- родной атмосфере (82). § 26. Приближенное рассмотрение сильного взрыва (85). § 27. Замечания о точечном взрыве с учетом противодействия (87). § 28. Адиа- батический разлет в пустоту газового шара (88). § 29. Автомодельные режимы разлета шара в пустоту (91).	
<b>Глава II. Тепловое излучение и лучистый теплообмен в среде . . . . .</b>	<b>93</b>
§ 1. Введение и основные понятия (93). § 2. Механизмы испускания, поглощения и рассеяния света в газах (96). § 3. Равновесное излучение и абсолютно черное тело (100). § 4. Вынужденное испускание (102). § 4а. Вынужденное излучение в классической и квантовой теориях и лазерный эффект (104). § 5. Уравнение переноса излучения (109). § 6. Интегральные выражения для интенсивности из- лучения (111). § 7. Излучение плоского слоя (113). § 8. Эффективная или яркост- ная температура поверхности неравномерно нагретого тела (117). § 9. Движение вещества с учетом лучистого теплообмена (119). § 10. Диффузионное прибли- жение (122). § 11. Приближение «вперед-назад» (125). § 12. Локальное равнов- вие и приближение лучистой теплопроводности (127). § 13. Взаимотношение диффузионного приближения и приближения лучистой теплопроводности (129). § 14. Лучистое равновесие в звездных фотосферах (131). § 15. Решение задачи о плоской фотосфере (135). § 16. Потери энергии нагретого тела на излучение (137). § 17. Уравнения гидродинамики с учетом энергии и давления излучения и лу- чистого теплообмена (140). § 18. Число квантов как инвариант классического электромагнитного поля (144).	
<b>Глава III. Термодинамические свойства газов при высоких температурах . . . . .</b>	<b>147</b>
1. Газ из невзаимодействующих частиц . . . . .	147

§ 1. Идеальный газ с постоянной теплоемкостью и неизменным числом частиц (147).	
§ 2. Расчеты термодинамических функций методом статистических сумм (149).	
§ 3. Диссоциация двухатомных молекул (153).	
§ 4. Химические реакции (157).	
§ 5. Ионизация и электронное возбуждение (160).	
§ 6. Электронная статистическая сумма и роль энергии возбуждения атомов (165).	
§ 7. Приближенный метод расчета в области многократной ионизации (167).	
§ 8. Интерполяционные формулы и эффективный показатель адиабаты (172).	
§ 9. Ударная адиабата в условиях диссоциации и ионизации (174).	
§ 10. Ударная адиабата с учетом равновесного излучения (177).	
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 (189).	
<b>Глава IV. Ударные трубы</b> . . . . .	192
§ 1. Использование ударной трубы для изучения физико-химической кинетики (192).	
§ 2. Принцип действия (193).	
§ 3. Элементарная теория ударной трубы (193).	
§ 4. Электромагнитные ударные трубки (197).	
§ 5. Методы измерений различных величин (200).	
<b>Глава V. Поглощение и испускание излучения в газах при высоких температурах</b>	202
§ 1. Введение. Типы электронных переходов (202).	
1. Непрерывный спектр . . . . .	204
§ 2. Тормозное излучение электрона в кулоновском поле иона (204).	
§ 2а. Тормозное излучение электрона при рассеянии нейтральным атомом (209).	
§ 3. Свободно-свободные переходы в нагретом ионизованном газе (211).	
§ 4. Эффективное сечение захвата электрона ионом с испусканием кванта (214).	
§ 5. Эффективное сечение связанно-свободного поглощения света атомами и ионами (216).	
§ 6. Коэффициент непрерывного поглощения в газе из водородоподобных атомов (219).	
§ 7. Непрерывное поглощение света в одноатомном газе в области первой ионизации (222).	
§ 8. Средние пробеги излучения при многократной ионизации атомов газа (226).	
§ 8а. Поглощение света в слабоионизованном газе (229).	
2. Линейчатый спектр атомов . . . . .	232
§ 9. Классическая теория спектральных линий (232).	
§ 10. Квантовая теория спектральных линий. Силы осцилляторов (235).	
§ 11. Спектр поглощения водородоподобных атомов. Замечания о влиянии линий на росселандов пробог (239).	
§ 12. Силы осцилляторов для континуума. Теорема сумм (242).	
§ 13. Излучение спектральных линий (244).	
3. Полосатый спектр молекул . . . . .	247
§ 14. Энергетические уровни двухатомных молекул (247).	
§ 15. Структура молекулярных спектров (251).	
§ 16. Принцип Франка–Кондона (254).	
§ 17. Вероятности молекулярных переходов с испусканием света (256).	
§ 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 . . . . .	267
§ 21. Оптические свойства нагретого воздуха (267).	
5. Пробой и нагревание газа под действием сфокусированного лазерного луча. . . . .	274
§ 22. Пробой (274).	
§ 23. Поглощение лазерного луча и нагревание газа после первичного пробоя (277).	
<b>Глава VI. Скорости релаксационных процессов в газах</b> . . . . .	282
1. Молекулярные газы . . . . .	282



§1. Установление термодинамического равновесия (282). §2. Возбуждение вращений молекул (284). §3. Уравнение кинетики для релаксации колебательной энергии молекул (285). §4. Вероятность возбуждения колебаний и время релаксации (288). §5. Уравнение кинетики диссоциации двухатомных молекул и время релаксации (292). §6. Скорости рекомбинации атомов и диссоциации двухатомных молекул (293). §7. Химические реакции и метод активированного комплекса (297). §8. Реакция окисления азота (301). §9. Скорость образования двуокиси азота при высоких температурах (305).	
2. Ионизация и рекомбинация. Электронное возбуждение и дезактивация . . . . .	307
§10. Основные механизмы (307). §11. Ионизация невозбужденных атомов электронным ударом (310). §12. Возбуждение атомов из основного состояния электронным ударом. Дезактивация (313). §13. Ионизация возбужденных атомов электронным ударом (314). §14. Ударные переходы между возбужденными состояниями атома (318). §15. Ионизация и возбуждение ударами тяжелых частиц (320). §16. Фотоионизация и фоторекомбинация (323). §17. Электрон-ионная рекомбинация при тройных столкновениях (элементарная теория) (326). §18. Более строгая теория рекомбинации при тройных столкновениях (328). §19. Ионизация и рекомбинация в воздухе (332).	
3. Плазма. . . . .	334
§20. Релаксация в плазме (334).	
<b>Глава VII. Структура фронта ударных волн в газах. . . . .</b>	<b>339</b>
§1. Введение (339).	
1. Скачок уплотнения. . . . .	342
§2. Вязкий скачок уплотнения (342). §3. Роли вязкости и теплопроводности в образовании скачка уплотнения (347). §4. Диффузия в бинарной смеси газов (351). §5. Диффузия в ударной волне, распространяющейся по бинарной смеси (353).	
2. Релаксационный слой. . . . .	356
§6. Ударные волны в газе с замедленным возбуждением некоторых степеней свободы (356). §7. Возбуждение молекулярных колебаний (360). §8. Диссоциация двухатомных молекул (364). §9. Ударные волны в воздухе (366). §10. Ионизация в одноатомном газе (368). §11. Ионизация в воздухе (375). §12. Ударные волны в плазме (376). §13. Поляризация плазмы и возникновение электрического поля в ударной волне (381).	
3. Лучистый теплообмен во фронте ударной волны. . . . .	384
§14. Качественная картина (384). §15. Приближенная формулировка задачи о структуре фронта (388). §16. Ударная волна докритической амплитуды (391). §17. Ударная волна сверхкритической амплитуды (394). §18. Ударная волна при больших плотности энергии и давлении излучения (397).	
<b>Глава VIII. Физико-химическая кинетика в гидродинамических процессах . . . .</b>	<b>400</b>
1. Динамика неравновесного газа. . . . .	400
§1. Уравнения газовой динамики при отсутствии термодинамического равновесия (400). §2. Возрастание энтропии (403). §3. Аномальные дисперсия и поглощение ультразвука (405). §4. Закон дисперсии и коэффициент поглощения ультразвука (409).	
2. Химические реакции . . . . .	413
§5. Окисление азота при сильном взрыве в воздухе (413).	
3. Нарушение термодинамического равновесия при разлете газа в пустоту . . . . .	418
§6. Разлет газового облака (418). §7. Эффект «закалки» (419). §8. Нарушение ионизационного равновесия (422). §9. Кинетика рекомбинации и охлаждение газа после нарушения ионизационного равновесия (424).	
4. Конденсация паров при адиабатическом расширении . . . . .	429

§ 10. Насыщение паров и возникновение центров конденсации (429).	§ 11. Термодинамика и кинетика процесса конденсации (431).	§ 12. Конденсация в облаке испаренного вещества, разлетающегося в пустоту (433).	§ 13. К вопросу о механизме образования космической пыли. Замечания о лабораторном исследовании конденсации (436).	
<b>Глава IX. Световые явления в ударных волнах и при сильном взрыве в воздухе</b>				<b>438</b>
1. Яркость фронта ударных волн большой амплитуды в газах . . . . .				438
§ 1. Качественная зависимость яркостной температуры от истинной температуры за фронтом (438).	§ 2. Поглощение световых квантов в холодном воздухе (442).	§ 3. Максимальная яркостная температура для воздуха (444).	§ 4. Предельная яркость очень сильной волны в воздухе (446).	
2. Оптические явления, наблюдаемые при сильном взрыве, и охлаждение воздуха излучением . . . . .				448
§ 5. Общее описание световых явлений (448).	§ 6. Отрыв фронта ударной волны от границы огненного шара (452).	§ 7. Эффект минимума яркости огненного шара (455).	§ 8. Охлаждение воздуха излучением (459).	§ 9. Возникновение температурного уступа — волны охлаждения (460).
§ 10. Энергетический баланс и скорость распространения волны охлаждения (462).	§ 11. Стягивание волны охлаждения к центру (464).	§ 12. Искровой разряд в воздухе (466).		
3. Структура фронта волны охлаждения . . . . .				467
§ 13. Постановка задачи (467).	§ 14. Поток излучения с поверхности фронта волны (470).	§ 15. Распределение температуры во фронте сильной волны (473).	§ 16. Учет адиабатического охлаждения (475).	
<b>Глава X. Тепловые волны</b>				<b>478</b>
§ 1. Теплопроводность вещества (478).	§ 2. Нелинейная (лучистая) теплопроводность (479).	§ 3. Особенности распространения тепла при линейной и нелинейной теплопроводностях (482).	§ 4. Закон распространения тепловой волны от мгновенного плоского источника (486).	§ 5. Автомодельная тепловая волна от мгновенного плоского источника (487).
§ 6. Распространение тепла от мгновенного точечного источника (490).	§ 7. Некоторые автомодельные плоские задачи (493).	§ 8. Замечания о проникновении тепла в среду при учете движения (496).	§ 9. Автомодельное решение как предельное решение неавтомодельной задачи (498).	§ 10. О переносе тепла неравновесным излучением (500).
<b>Глава XI. Ударные волны в твердых телах</b>				<b>503</b>
§ 1. Введение (503).				
1. Термодинамические свойства твердых тел при высоких давлениях и температурах				506
§ 2. Сжатие холодного вещества (506).	§ 3. Тепловое движение атомов (509).	§ 4. Уравнение состояния тела, атомы которого совершают малые колебания (512).	§ 5. Тепловое возбуждение электронов (516).	§ 6. Трехчленное уравнение состояния (518).
2. Ударная адиабата . . . . .				519
§ 7. Ударная адиабата конденсированного вещества (519).	§ 8. Аналитические представления ударной адиабаты (521).	§ 9. Ударные волны слабой интенсивности (523).	§ 10. Ударное сжатие пористого вещества (524).	§ 11. Выход не очень сильной ударной волны на свободную поверхность тела (527).
§ 12. Экспериментальные методы отыскания ударной адиабаты твердых тел (531).	§ 13. Извлечение кривой холодного сжатия из результатов опытов по ударному сжатию (537).			
3. Акустические волны и расщепление волн . . . . .				538
§ 14. Статическая деформация твердого тела (538).	§ 15. Переход твердого тела в текучее состояние (542).	§ 16. Скорость распространения акустических волн (545).	§ 17. Расщепление волн сжатия и разгрузки (547).	§ 18. Измерение скорости звука в веществе, сжатом ударной волной (549).
§ 19. Фазовые пре-				

вращения и расщепление ударных волн (552). § 20. Ударная волна разрежения в среде, испытывающей фазовый переход (556).	
4. Явления при выходе мощной ударной волны на свободную поверхность тела . . . .	560
§ 21. Предельные случаи твердого и газообразного состояний разгруженного вещества (560). § 22. Критерий полного испарения вещества при разгрузке (563). § 23. Опытное определение температуры и энтропии в мощной ударной волне при помощи исследования разгруженного вещества в газовой фазе (566). § 24. Свечение паров металла при разгрузке (569). § 25. Замечания о принципиальной возможности измерения энтропии в ударной волне по свечению при разгрузке (573).	
5. Некоторые другие явления . . . . .	573
§ 26. Электропроводность неметаллических тел в ударных волнах (573). § 27. Измерение показателя преломления вещества, сжатого в ударной волне (575).	
<b>Глава XII. Некоторые автомодельные процессы в газовой динамике . . . . .</b>	<b>578</b>
1. Введение . . . . .	578
§ 1. Группы преобразований, допускаемые уравнениями газовой динамики (578). § 2. Автомодельные движения (580). § 3. Условия автомодельности движения (582). § 4. Два типа автомодельных решений (583).	
2. Схождение к центру сферической ударной волны и захлопывание пузырьков в жидкости . . . . .	585
§ 5. Постановка задачи о сходящейся ударной волне (585). § 6. Основные уравнения (586). § 7. Исследование уравнений (588). § 8. Результаты решения (592). § 9. Захлопывание пузырьков. Задача Рэлея (595). § 10. Захлопывание пузырьков. Учет сжимаемости и вязкости (597).	
3. Выход ударной волны на поверхность звезды . . . . .	599
§ 11. Распространение ударной волны при степенном законе уменьшения плотности (599). § 12. К вопросу о вспышках сверхновых звезд и происхождении космических лучей (602).	
4. Движение газа под действием кратковременного удара . . . . .	605
§ 13. Постановка задачи и общий характер движения (605). § 14. Автомодельное решение и законы сохранения энергии и импульса (607). § 15. Решение уравнений (610). § 16. Ограничение показателя автомодельности законами сохранения импульса и энергии (614). § 17. Выход неавтомодельного движения на предельный режим и «бесконечность» энергии в автомодельном решении (615). § 18. Сосредоточенный удар по поверхности газа (взрыв на поверхности) (618). § 19. Результаты упрощенного рассмотрения автомодельного движения при сосредоточенном и нитевом ударах (621). § 20. Удар при падении очень быстрого метеорита на поверхность планеты (622). § 21. Сильный взрыв в неограниченной пористой среде (624).	
5. Распространение ударных волн в неоднородной атмосфере с экспоненциальным распределением плотности . . . . .	626
§ 22. Сильный точечный взрыв (626). § 23. Автомодельное движение ударной волны в сторону возрастания плотности (628). § 24. Приложение автомодельного решения к взрыву (632). § 25. Автомодельное движение ударной волны в сторону уменьшения плотности. Приложение к взрыву (633).	
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ . . . . .</b>	<b>636</b>
Некоторые часто употребляемые константы, соотношения между единицами, формулы	636
Список литературы . . . . .	639