

Я. Б. ЗЕЛЬДОВИЧ и Ю. П. РАЙЗЕР

**ФИЗИКА УДАРНЫХ ВОЛН
И ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ
ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ
ЯВЛЕНИЙ**

ИЗДАНИЕ ВТОРОЕ ДОПОЛНЕННОЕ



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

МОСКВА 1966

530.1
3 50
УДК 541.12

АННОТАЦИЯ

В книге систематически рассматривается обширный круг 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.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие ко второму изданию	9
Предисловие к первому изданию	11

ГЛАВА I

ЭЛЕМЕНТЫ ГАЗОДИНАМИКИ И КЛАССИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ УДАРНЫХ ВОЛН

1. Непрерывное течение невязкого и нетеплопроводного газа	13
§ 1. Уравнения газовой динамики (13). § 2. Лагранжевы координаты (16). § 3. Звуковые волны (18). § 4. Сферические звуковые волны (23). § 5. Характеристики (24). § 6. Плоское изэнтропическое течение. Инва- рианты Римана (27). § 7. Плоское изэнтропическое течение газа в огра- ниченном пространстве (31). § 8. Простые волны (33). § 9. Искажение профилей в бегущей волне конечной амплитуды. Некоторые свойства простых волн (35). § 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 (50). § 15. Ударные волны в идеальном газе с постоя- нной теплоемкостью (51). § 16. Геометрическая интерпретация законо- мерностей ударного сжатия (54). § 17. Невозможность существования ударной волны разрежения в веществе с нормальными свойствами (58). § 18. Ударные волны слабой интенсивности (61). § 19. Ударные волны в веществе с аномальными термодинамическими свойствами (64).	
3. Вязкость и теплопроводность в газодинамике	66
§ 20. Уравнения одномерного движения газа (66). § 21. Замечания о вто- рой вязкости (69). § 22. Замечания о поглощении звука (70). § 23. Струк- тура и ширина фронта ударной волны слабой интенсивности (70).	
4. Некоторые задачи	77
§ 24. Распространение произвольного разрыва (77). § 25. Сильный взрыв в однородной атмосфере (84). § 26. Приближенное рассмотрение сильно- го взрыва (87). § 27. Замечания о точечном взрыве с учетом противодав- ления (89). § 28. Адиабатический разлет в пустоту газового шара (91). § 29. Автомодельные режимы разлета шара в пустоту (93).	

ГЛАВА II

ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ И ЛУЧИСТЫЙ ТЕПЛОБМЕН В СРЕДЕ

§ 1. Введение и основные понятия (96). § 2. Механизмы испускания, по- глощения и рассеяния света в газах (99). § 3. Равновесное излучение и абсолютно черное тело (103). § 4. Вынужденное испускание (105). § 4а. Вынужденное излучение в классической и квантовой теориях и ла- зерный эффект (108). § 5. Уравнение переноса излучения (113). § 6. Ин- тегральное выражение для интенсивности излучения (115). § 7. Излуче-

ние плоского слоя (117). § 8. Эффективная или яркостная температура поверхности неравномерно нагретого тела (121). § 9. Движение вещества с учетом лучистого теплообмена (124). § 10. Диффузионное приближение (127). § 11. Приближение «вперед—назад» (131). § 12. Локальное равновесие и приближение лучистой теплопроводности (132). § 13. Взаимоотношение диффузионного приближения и приближения лучистой теплопроводности (134). § 14. Лучистое равновесие в звездных фотосферах (137). § 15. Решение задачи о плоской фотосфере (140). § 16. Потери энергии нагретого тела на излучение (143). § 17. Уравнения гидродинамики с учетом энергии и давления излучения и лучистого теплообмена (146). § 18. Число квантов, как инвариант классического электромагнитного поля (149).

ГЛАВА III

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГАЗОВ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

1. Газ из невзаимодействующих частиц 152
 - § 1. Идеальный газ с постоянной теплоемкостью и неизменным числом частиц (152). § 2. Расчеты термодинамических функций методом статистических сумм (155). § 3. Диссоциация двухатомных молекул (158). § 4. Химические реакции (163). § 5. Ионизация и электронное возбуждение (166). § 6. Электронная статистическая сумма и роль энергии возбуждения атомов (171). § 7. Приближенный метод расчета в области многократной ионизации (174). § 8. Интерполяционные формулы и эффективный показатель адиабаты (179). § 9. Ударная адиабата в условиях диссоциации и ионизации (181). § 10. Ударная адиабата с учетом равновесного излучения (184).
2. Газ из частиц с кулоновским взаимодействием 186
 - § 11. Разреженный ионизованный газ (186). § 12. Плотный газ. Элементы квантовой статистики Ферми—Дирака для электронного газа (189). § 13. Модель атома по Томасу—Ферми и сильное сжатие холодного вещества (192). § 14. Вычисление термодинамических функций высоконагретого плотного газа методом Томаса—Ферми (198).

ГЛАВА IV

УДАРНЫЕ ТРУБЫ

§ 1. Использование ударной трубы для изучения физико-химической кинетики (201). § 2. Принцип действия (202). § 3. Элементарная теория ударной трубы (203). § 4. Электромагнитные ударные трубки (206). § 5. Методы измерений различных величин (209).

ГЛАВА V

ПОГЛОЩЕНИЕ И ИСПУСКАНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ В ГАЗАХ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

§ 1. Введение. Типы электронных переходов (212).

1. Непрерывный спектр 214

§ 2. Тормозное излучение электрона в кулоновском поле иона (214). § 2а. Тормозное излучение электрона при рассеянии нейтральным атомом (219). § 3. Свободно-свободные переходы в нагретом ионизованном газе (222). § 4. Эффективное сечение захвата электрона ионом с испусканием кванта (225). § 5. Эффективное сечение связанно-свободного поглощения света атомами и ионами (227). § 6. Коэффициент непрерывного поглощения в газе из водородоподобных атомов (231). § 7. Непрерывное поглощение света в одноатомном газе в области первой ионизации (234). § 8. Средние пробеги излучения при многократной ионизации атомов газа (238). § 8а. Поглощение света в слабоионизованном газе (242).	
2. Линейчатый спектр атомов	244
§ 9. Классическая теория спектральных линий (244). § 10. Квантовая теория спектральных линий. Силы осцилляторов (248). § 11. Спектр поглощения водородоподобных атомов. Замечания о влиянии линий на расселендов пробег (252). § 12. Силы осцилляторов для континуума. Теорема сумм (256). § 13. Излучение спектральных линий (258).	
3. Полосатый спектр молекул	260
§ 14. Энергетические уровни двухатомных молекул (260). § 15. Структура молекулярных спектров (264). § 16. Принцип Франка—Кондона (268). § 17. Вероятности молекулярных переходов с испусканием света (270). § 18. Коэффициент поглощения света в линиях (275). § 14. Молекулярное поглощение при высоких температурах (276). § 20. Уточненный расчет коэффициента молекулярного поглощения при высоких температурах (279).	
4. Воздух	281
§ 21. Оптические свойства нагретого воздуха (281).	
5. Пробой и нагревание газа под действием сфокусированного лазерного луча 289 § 22. Пробой (289). § 23. Поглощение лазерного луча и нагревание газа	

ГЛАВА VI

СКОРОСТИ РЕЛАКСАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ГАЗАХ

1. Молекулярные газы	298
§ 1. Установление термодинамического равновесия (298). § 2. Возбуждение вращений молекул (300). § 3. Уравнение кинетики для релаксации колебательной энергии молекул (302). § 4. Вероятность возбуждения колебаний и время релаксации (304). § 5. Уравнение кинетики диссоциации двухатомных молекул и время релаксации (309). § 6. Скорости рекомбинации атомов и диссоциации двухатомных молекул (310). § 7. Химические реакции и метод активированного комплекса (314). § 8. Реакция окисления азота (319). § 9. Скорость образования двуокси азота при высоких температурах (322).	
2. Ионизация и рекомбинация. Электронное возбуждение и дезактивация	325
§ 10. Основные механизмы (325). § 11. Ионизация невозбужденных атомов электронным ударом (329). § 12. Возбуждение атомов из основного состояния электронным ударом. Дезактивация (332). § 13. Ионизация	

возбужденных атомов электронным ударом (333). § 14. Ударные переходы между возбужденными состояниями атомов (337). § 15. Ионизация и возбуждение ударами тяжелых частиц (339). § 16. Фотоионизация и фоторекомбинация (341). § 17. Электрон-ионная рекомбинация при тройных столкновениях (элементарная теория) (345). § 18. Более строгая теория рекомбинации при тройных столкновениях (347). § 19. Ионизация и рекомбинация в воздухе (351).	
3. Плазма	353
§ 20. Релаксация в плазме (353).	

ГЛАВА VII

СТРУКТУРА ФРОНТА УДАРНЫХ ВОЛН В ГАЗАХ

§ 1. Введение (359).	
1. Скачок уплотнения	362
§ 2. Вязкий скачок уплотнения (362). § 3. Роли вязкости и теплопроводности в образовании скачка уплотнения (368). § 4. Диффузия в бинарной смеси газов (371). § 5. Диффузия в ударной волне, распространяющейся по бинарной смеси (374).	
2. Релаксационный слой	377
§ 6. Ударные волны в газе с замедленным возбуждением некоторых степеней свободы (377). § 7. Возбуждение молекулярных колебаний (381). § 8. Диссоциация двухатомных молекул (385). § 9. Ударные волны в воздухе (388). § 10. Ионизация в одноатомном газе (390). § 11. Ионизация в воздухе (396). § 12. Ударные волны в плазме (398). § 13. Поляризация плазмы и возникновение электрического поля в ударной волне (404).	
3. Лучистый теплообмен во фронте ударной волны	407
§ 14. Качественная картина (407). § 15. Приближенная формулировка задачи о структуре фронта (410). § 16. Ударная волна докритической амплитуды (414). § 17. Ударная волна сверхкритической амплитуды (417). § 18. Ударная волна при больших плотности энергии и давлении излучения (420).	

ГЛАВА VIII

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ КИНЕТИКА В ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

1. Динамика неравновесного газа	423
§ 1. Уравнения газовой динамики при отсутствии термодинамического равновесия (423). § 2. Возрастание энтропии (426). § 3. Аномальные дисперсия и поглощение ультразвука (428). § 4. Закон дисперсии и коэффициент поглощения ультразвука (432).	
2. Химические реакции	487
§ 5. Окисление азота при сильном взрыве в воздухе (437).	
3. Нарушение термодинамического равновесия при разлете газа в пустоту ...	442

- § 6. Разлет разового облака (442). § 7. Эффект «закалки» (444). § 8. Нарушение ионизационного равновесия (446). § 9. Кинетика рекомбинации и охлаждение газа после нарушения ионизационного равновесия (448).
4. Конденсация паров при адиабатическом расширении 454
- § 10. Насыщение паров в возникновение центров конденсации (454). § 11. Термодинамика и кинетика процесса конденсации (456). § 12. Конденсация в облаке испаренного вещества, разлетающегося в пустоту (458). § 13. К вопросу о механизме образования космической пыли. Замечания о лабораторном исследовании конденсации (462).

ГЛАВА IX

СВЕТОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ В УДАРНЫХ ВОЛНАХ И ПРИ СИЛЬНОМ ВЗРЫВЕ В ВОЗДУХЕ

1. Яркость фронта ударных волн большой амплитуды в газах 464
- § 1. Качественная зависимость яркостной температуры от истинной температуры за фронтом (464). § 2. Поглощение световых квантов в холодном воздухе (468). § 3. Максимальная яркостная температура для воздуха (470). § 4. Предельная яркость очень сильной волны в воздухе (472).
2. Оптические явления, наблюдаемые при сильном взрыве, и охлаждение воздуха излучением 474
- § 5. Общее описание световых явлений (474). § 6. Отрыв фронта ударной волны от границы огненного шара (479). § 7. Эффект минимума яркости огненного шара (482). § 8. Охлаждение воздуха излучением (485). § 9. Возникновение температурного уступа — волны охлаждения (487). § 10. Энергетический баланс и скорость распространения волны охлаждения (489). § 11. Стягивание волны охлаждения к центру (491). § 12. Искровой разряд в воздухе (493).
3. Структура фронта волны охлаждения 495
- § 13. Постановка задачи (495). § 14. Поток излучения с поверхности фронта волны (498). § 15. Распределение температуры во фронте сильной волны (501). § 16. Учет адиабатического охлаждения (503).

ГЛАВА X

ТЕПЛОВЫЕ ВОЛНЫ

- § 1. Теплопроводность вещества (506). § 2. Нелинейная (лучистая) теплопроводность (507). § 3. Особенности распространения тепла при линейной и нелинейной теплопроводностях (510). § 4. Закон распространения теплотой волны от мгновенного плоского источника (515). § 5. Автомодельная тепловая волна от мгновенного плоского источника (516). § 6. Распространение тепла от мгновенного точечного источника (519). § 7. Некоторые автомодельные плоские задачи (523). § 8. Замечания о проникновении тепла в среду при учете движения (526). § 9. Автомодельное решение как предельное решение неавтомодельной задачи (528). § 10. О переносе тепла неравновесным излучением (530).

ГЛАВА XI

УДАРНЫЕ ВОЛНЫ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ

- § 1. Введение (533).
1. Термодинамические свойства твердых тел при высоких давлениях и температурах 536
 - § 2. Сжатие холодного вещества (536). § 3. Тепловое движение атомов (540). § 4. Уравнение состояния тела, атомы которого совершают малые колебания (542). § 5. Тепловое возбуждение электродов (546). § 6. Трехчленное уравнение состояния (549).
 2. Ударная адиабата 549
 - § 7. Ударная адиабата конденсированного вещества (549). § 8. Аналитические представления ударной адиабаты (552). § 9. Ударные волны слабой интенсивности (554). § 10. Ударное сжатие пористого вещества (555). § 11. Выход не очень сильной ударной волны на свободную поверхность тела (558). § 12. Экспериментальные методы отыскания ударной адиабаты твердых тел (562). § 13. Извлечение кривой холодного сжатия из результатов опытов по ударному сжатию (568).
 3. Акустические волны и расщепление волн 570
 - § 14. Статическая деформация твердого тела (570). § 15. Переход твердого тела в текуче состояние (574). § 16. Скорость распространения акустических волн (577). § 17. Расщепление волн сжатия и разгрузки (579). § 18. Измерение скорости звука в веществе, сжатом ударной волной (581). § 19. Фазовые превращения и расщепление ударных волн (584). § 20. Ударная волна разрежения в среде, испытывающей фазовый переход (589).
 4. Явления при выходе мощной ударной волны на свободную поверхность тела 592
 - § 21. Предельные случаи твердого в газообразном состоянии разгруженного вещества (592). § 22. Критерий полного испарения вещества при разгрузке (595). § 23. Опытное определение температуры и энтропии в мощной ударной волне при помощи исследования разгруженного вещества в газовой фазе (599). § 24. Свечение паров металла при разгрузке (601). § 25. Замечания о принципиальной возможности измерения энтропии в ударной волне по свечению при разгрузке (605).
 5. Некоторые другие явления 605
 - § 26. Электропроводность неметаллических тел в ударных волнах (605). § 27. Измерение показателя преломления вещества, сжатого в ударной волне (608).

ГЛАВА XII

НЕКОТОРЫЕ АВТОМОДЕЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ
В ГАЗОВОЙ ДИНАМИКЕ

1. Введение 610
 - § 1. Группы преобразований, допускаемые уравнениями газовой динамики (610). § 2. Автомодельные движения (612). § 3. Условия автомодельности движения (615). § 4. Два типа автомодельных решений (616).

2. Схождение к центру сферической Ударной волны и захлопывание пузырьков в жидкости	618
§ 5. Постановка задачи о сходящейся ударной волне (618). § 6. Основные уравнения (619). § 7. Исследование уравнений (621). § 8. Результаты решения (625). § 9. Захлопывание пузырьков. Задача Рэлея (628). § 10. Захлопывание пузырьков. Учет сжимаемости и вязкости (630).	
3. Выход ударной волны на поверхность звезды	632
§ 11. Распространение ударной волны при степенном законе уменьшения плотности (632). § 12. К вопросу о вспышках сверхновых звезд и происхождении космических лучей (636).	
4. Движение газа под действием кратковременного удара	639
§ 13. Постановка задачи и общий характер движения (639). § 14. Автомодельное решение и закон сохранения энергии и импульса (641). § 15. Решение уравнений (644) § 16. Ограничение показателя автомодельности законами сохранения импульса и энергии (648). § 17. Выход неавтомодельного движения на предельный режим и «бесконечность» энергии в автомодельном решении (649). § 18. Сосредоточенный удар по поверхности газа (взрыв на поверхности) (653). § 19. Результаты упрощенного рассмотрения автомодельного движения при сосредоточенном и нитевом ударах (655). § 20. Удар при падении очень быстрого метеорита на поверхность планеты (657). § 21. Сильный взрыв в неограниченной пористой среде (659).	
5. Распространение ударных волн в неоднородной атмосфере с экспоненциальным распределением плотности	661
§ 22. Сильный точечный взрыв (661). § 23. Автомодельное движение ударной волны в сторону возрастания плотности (663). § 24. Приложение автомодельного решения к взрыву (667). § 25. Автомодельное движение ударной волны в сторону уменьшения плотности. Приложение к взрыву (668).	
Приложение	672
Литература	675

ПРЕДИСЛОВИЕ КО ВТОРОМУ ИЗДАНИЮ

Общая структура книги и большая часть текста во втором издании оставлены без изменений. Вместе с тем некоторые разделы подверглись существенной переработке и добавлено значительное количество нового материала. В гл. V включен раздел, посвященный процессам пробоя (бурной ионизации) и нагревания газов под действием сфокусированного лазерного луча. Это — одно из интереснейших явлений в сфере взаимодействия интенсивного светового потока с веществом. Оно было обнаружено на опыте несколько лет назад, вскоре после создания лазеров, дающих огромные импульсные мощности в десятки мегаватт и выше, и сразу же привлекло к себе внимание многих физиков (в том числе и авторов книги, которые опубликовали работы по теории явления).

В связи с вопросами ионизации газа под действием лазерного излучения в гл. V добавлены параграфы, в которых рассматриваются излучение и поглощение света свободными электронами при столкновениях с нейтральными атомами. Живейший интерес, который сейчас проявляется к лазерам, побудил нас написать специальный параграф (в гл. II), посвященный полуклассической трактовке, индуцированного испускания и лазерного эффекта.

Большим изменениям подвергся раздел 3 гл. VI, в котором рассматриваются вопросы ионизации, рекомбинации, электронного возбуждения. Этот раздел по существу написан заново и сильно расширен с учетом современных взглядов, согласно которым в этих процессах большую роль играют ступенчатая ионизация атомов (сначала возбуждение, потом ионизация) и захват электрона при тройных столкновениях на верхние уровни атомов с последующей дезактивацией возбужденных атомов за счет электронных ударов и радиационных переходов. Подробнее рассмотрена ионизация воздуха. Изменилось и изложение близких вопросов ионизации газа в ударной волне (в гл. VII).

Заново написаны параграфы гл. VIII, касающиеся кинетики изменения степени ионизации и «заковки» при разлете ионизованного газа в пустоту. Этот вопрос был недавно пересмотрен с учетом вышеизложенного.

В гл. XII на основе материала первого издания и новых результатов выделен специальный раздел о распространении ударных волн в неоднородной

атмосфере с экспоненциальным распределением плотности. Добавлено Приложение, где собраны некоторые константы, соотношений между атомными постоянными, соотношения между единицами и формулы, часто встречающиеся при практической работе по тематике книги. Библиография пополнена ссылками на работы последних лет.

Здесь упомянуты лишь основные, но далеко не все изменения и дополнения; разумеется, были также исправлены ошибки и опечатки, замеченные в первом издании.

Разделы физики в механики, затронутые в книге, развиваются исключительно быстро, причем открываются все новые и новые объекты их приложений (пример тому — явление пробоя и нагревания газов в фокусе лазерного луча).

Одним из свидетельств интереса, который проявляется к этим областям науки, служит то, что сразу же после выхода книги (в первом издании) ее начало переводить на английский язык американское издательство. Мы надеемся, что второе, переработанное и дополненное издание окажется полезным как специалистам, работающим в областях науки и техники, близких к профилю книги, так и тем, кто вступает в эти области. Мы благодарны нашим коллегам, указавшим на неточности и опечатки в первом издании книги.

ПРЕДИСЛОВИЕ К ПЕРВОМУ ИЗДАНИЮ

Проблемы современной техники потребовали от науки проникновения в область «высоких параметров» состояния вещества: больших концентраций энергии, высоких температур и давлений, больших скоростей. На практике такие условия осуществляются в сильных ударных волнах, при взрывах, при очень быстрых сверхзвуковых движениях тел в атмосфере, в мощных электрических разрядах и т.д.

При высоких температурах в газах протекают разнообразные физические и физико-химические процессы: возбуждение молекулярных колебаний, диссоциация, химические реакции, ионизация, излучение света. Эти процессы влияют на термодинамические свойства газов, а при достаточно быстрых движениях и достаточно быстрых изменениях состояния вещества на движение оказывает влияние и кинетика указанных процессов. Особенно важную роль при очень высоких температурах играют процессы, связанные с испусканием и поглощением излучения, и лучистый теплообмен. Перечисленные выше процессы часто представляют интерес и не только с точки зрения их энергетического влияния на движение газа: они вызывают изменение состава газа, его электрических свойств, приводят к свечению газа и возникновению многих оптических эффектов и т. д. Изучению всех этих вопросов, всему тому, что составляет содержание вновь возникшей ветви науки — «физической газодинамики», и посвящена значительная часть книги.

Большой научный и практический интерес представляет изучение сильных ударных волн в твердых телах. Недавние достижения, позволившие при помощи ударных волн сжать твердые тела до миллионов атмосфер, открыли новые пути исследования состояния твердого вещества при сверхвысоких давлениях. Этим вопросам также уделено в книге большое внимание.

В описываемой области тесно переплетаются многие разделы науки: газовая динамика, теория ударных волн, термодинамика и статистическая физика, молекулярная физика, физическая и химическая кинетики, физическая химия, спектроскопия, теория излучения, элементы астрофизики, физика твердого тела и др. Многие из рассматриваемых здесь физических явлений и процессов имеют различный характер и никак не связаны между собой. Следствием такой разнородности материала явилось отсутствие цельности в содержании книги. Некоторые главы имеют самостоятельный характер, относятся к совершенно различным областям физики или механики, и не все главы связаны между собой. Поэтому читателю, интересующемуся тем или иным вопросом, достаточно познакомиться только с соответствующими главами.

При рассмотрении самых различных вопросов, даже математического характера, мы стремились прежде всего, разъяснить физическую сущность явлений при помощи простейших математических средств, широко пользуясь оценками и полукачественным анализом. Вместе с тем мы стремились помочь тем физикам, механикам и инженерам, которые работают в соответствующих областях прикладной физики и техники, и дать им практические средства для самостоятельного анализа сложных и многообразных физических явлений.

С этой целью рассмотрение большинства явлений доведено до численных результатов, формулы для расчета и оценок различных величин запи-

саны в удобной для практической работы форме, приводится много полезных экспериментальных данных и сведений справочного характера и т. д.

Книга имеет теоретический характер, и описание экспериментальных установок и методов сведено к минимуму. Однако изложению результатов эксперимента и сопоставлению их с результатами теоретических расчетов и оценок уделяется должное внимание.

Периодическая литература по «физической газодинамике» огромна. Однако, насколько нам известно, ни в нашей, ни в зарубежной литературе еще не делалось попыток систематизировать, обобщить и изложить с единой точки зрения в одной книге материал, относящийся к этой новой области науки. По-видимому, книга представляет собой первый опыт в этом направлении.

Книга была написана в течение 1960—1961 гг., чем определяется основной уровень использованной литературы. Однако в разделы, касающиеся вопросов, представления по которым совершенствуются особенно быстрыми темпами, позднее были внесены краткие дополнения и ссылки на новейшую литературу. Это относится в основном к главам V, VI, VII.

Многообразие явлений и обширность материала заставили нас ограничиться рассмотрением далеко не всех вопросов, которые имеют отношение к изучаемой области. Мы не рассматриваем математической стороны гидродинамики, такой проблемы, как обтекание тел сверхзвуковым потоком, почти не затрагиваем электромагнитных явлений, совершенно не касаемся вопросов термоядерного синтеза, поведения плазмы в магнитном поле, всего, что относится к магнитной гидро- и газодинамике, вопросов горения и детонации и т. п. По всем этим разделам уже имеется немало книг.

Выбор материала книги в известной степени субъективен. Значительное место уделяется рассмотрению явлений, которые авторы исследовали в своих собственных работах. Так, на оригинальных работах почти полностью основаны гл. VIII и IX, в большой степени — VII, X, XII, частично — гл. XI. Гл. I представляет собой результат коренной переработки ранней книги одного из авторов «Теория ударных волн и введение в газодинамику», которая была издана в 1946 г. в Издательстве АН СССР.

Нам хотелось бы выразить особую признательность А. С. Компанейцу, которому принадлежит разработка ряда вопросов, затрагиваемых в книге, за многие полезные обсуждения и замечания, сделанные при чтении рукописи. Мы благодарны Л. В. Альтшулеру и С. Б. Кормеру, на работах которых в значительной степени основана гл. XI книги, за замечания, сделанные при чтении рукописи этой главы. Мы благодарны также М. А. Ельящеву, который внимательно прочел рукопись и сделал ценные замечания.