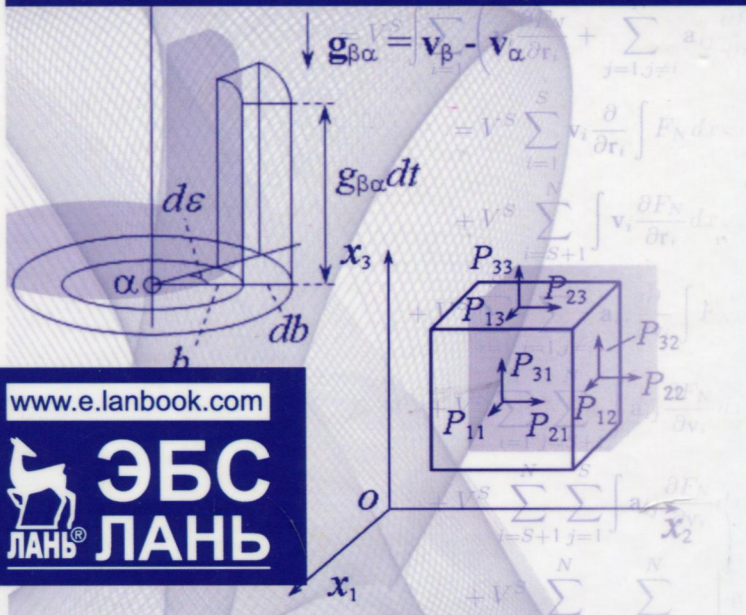


КИНЕТИКА РАЗРЕЖЕННОГО ГАЗА

В. Г. Черняк



www.e.lanbook.com



**ЭБС
ЛАНЬ**

В. Г. ЧЕРНЯК

КИНЕТИКА РАЗРЕЖЕННОГО ГАЗА

Учебное пособие



· САНКТ-ПЕТЕРБУРГ ·
· МОСКВА ·
· КРАСНОДАР ·
2021

ББК 22.317я73

Ч 49

Черняк В. Г.

Ч 49 Кинетика разреженного газа: Учебное пособие. — СПб.: Издательство «Лань», 2021. — 540 с.: ил. — (Учебники для вузов. Специальная литература).

ISBN 978-5-8114-3034-5

Учебное пособие рассчитано на трехуровневое обучение: бакалавриат-магистратура-аспирантура. Включает основы статистической физики неравновесных систем. Излагаются вывод, свойства и методы решения уравнения Больцмана, явления переноса в разреженных газах и вычисление коэффициентов переноса, связь кинетической теории газов с термодинамикой необратимых процессов. Приводятся решения прикладных задач динамики разреженного газа.

Предназначено студентам и аспирантам, обучающимся по направлению подготовки «Физика». Часть материала может быть полезна при подготовке специалистов в области вакуумной и авиационной техники, а также научным работникам, которые хотели бы самостоятельно изучить или освежить свои знания по кинетической теории газов.

ББК 22.317я73

Рецензенты:

Н. М. ЗУБАРЕВ — доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Института электрофизики УрО РАН, член-корреспондент РАН;
Е. А. ПАМЯТНЫХ — доктор физико-математических наук, профессор кафедры теоретической и математической физики Института естественных наук и математики Уральского федерального университета.

Обложка
Е. А. ВЛАСОВА

© Издательство «Лань», 2021
© В. Г. Черняк, 2021
© Издательство «Лань»,
художественное оформление, 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	9
Задачи кинетической теории	11
Глава 1. Определяющие величины	13
1.1. Модель разреженного газа	13
1.2. От динамического описания к статистическому	14
1.2.1. Динамическое описание (14). 1.2.2. Фазовое пространство (16). 1.2.3. Ансамбль Гиббса (17). 1.2.4. N-частичная функция распределения (18). 1.2.5. Фазовые средние (20). 1.2.6. Усеченные функции распределения (21). 1.2.7. Гипотеза молекулярного хаоса (22).	
1.3. Функция распределения для разреженного газа	23
1.3.1. 6-мерное фазовое пространство (23). 1.3.2. Физически бесконечно малые элемент объема и промежуток времени (23). 1.3.3. Локальная микроскопическая фазовая плотность (24). 1.3.4. Функция распределения (25).	
1.4. Средние величины для однокомпонентного газа	26
1.4.1. Средние по скоростям молекул (26). 1.4.2. Физические величины (28).	
1.5. Векторы потоков	29
1.5.1. Общее определение вектора потока (29). 1.5.2. Векторы потоков физических величин (31).	
1.6. Физические величины для газовых смесей	33
1.7. Динамика парных столкновений	37
1.8. Эффективные сечения рассеяния	44
1.9. Модели потенциала парного взаимодействия	46
1.9.1. Межмолекулярные силы отталкивания и притяжения (46). 1.9.2. Модели межмолекулярных потенциалов (52).	
1.10. Транспортные сечения рассеяния	57

1.11. Средняя частота столкновений. Средняя длина свободного пробега.	61
1.11.1. Средняя длина свободного пробега в равновесном газе (63). 1.11.2. Рассеяние молекулярного пучка (66).	
Глава 2. Уравнение Больцмана и его свойства.	69
2.1. Физический вывод уравнения Больцмана.	69
2.2. Уравнение Больцмана как уравнение непрерывности “фазового газа”	76
2.3. Симметрия интеграла столкновений.	80
2.4. H-функция	82
2.5. H-теорема	88
2.6. Микроскопическая обратимость и макроскопическая необратимость.	90
2.7. Детальное равновесие	92
2.7.1. Равновесие в поле внешних сил (95). 2.7.2. Свойства максвелловского распределения (97).	
2.8. H-функция и энтропия	99
2.9. Безразмерное уравнение Больцмана.	100
2.10. Линеаризованное уравнение Больцмана.	103
Глава 3. Вывод уравнения Больцмана из уравнения Лиувилля	107
3.1. Потенциальная энергия макроскопической системы	107
3.2. Уравнение Лиувилля	109
3.3. Последовательность усеченных функций распределения.	111
3.4. Цепочка уравнений ББГКИ.	112
3.5. Кинетическое уравнение Власова.	117
3.5.1. Плазма (117). 3.5.2. Дебаевское экранирование (118). 3.5.3. Плазменный параметр (119). 3.5.4. Уравнение с самосогласованным полем (120).	
3.6. Иерархия временных масштабов	122
3.7. Вириальное разложение.	125
3.8. Метод Боголюбова	127
3.9. Уравнение Больцмана	134
3.10. Заключительные замечания.	139

Глава 4. Макроскопические уравнения сохранения	142
4.1. Общее уравнение переноса	142
4.2. Уравнения непрерывности	144
4.3. Уравнение сохранения импульса	146
4.4. Уравнение сохранения энергии	148
4.5. Незамкнутость системы уравнений сохранения	151
Глава 5. Метод Чепмена — Энскога	153
5.1. Цель, задачи, идеи метода	153
5.2. Схема последовательных приближений для уравнений сохранения	156
5.3. Цепочка кинетических уравнений	161
5.4. Нулевое приближение	163
5.5. Уравнение первого порядка	165
5.6. Решение уравнения первого порядка	167
5.7. Макроскопические потоки и коэффициенты переноса.	171
5.7.1. Диффузионная скорость (171). 5.7.2. Тензор напряжений (176). 5.7.3. Плотность теплового потока (178).	
5.8. Замкнутая система уравнений гидрогазодинамики	181
5.9. Однокомпонентный газ	183
5.9.1. Скорость релаксации газа (185).	
5.10. Бинарная газовая смесь	187
5.10.1. Диффузионный поток (187). 5.10.2. Самодиффузия (191). 5.10.3. Плотность теплового потока (192).	
5.11. Законы диффузии Фика	193
5.12. Полиномы Сонина — Лагерра	196
5.13. Коэффициент вязкости	197
5.13.1. Элементарная кинетическая теория вязкости газа (197). 5.13.2. Вычисление коэффициента вязкости на основе метода Чепмена — Энскога (199). 5.13.3. Многокомпонентная газовая смесь (209). 5.13.4. Примеры расчета коэффициента вязкости (212).	
5.14. Коэффициент теплопроводности.	215
5.14.1. Элементарная кинетическая теория теплопроводности газа (215). 5.14.2. Вычисление коэффициента теплопроводности на основе метода Чепмена — Энскога (218). 5.14.3. Многокомпонентная газовая смесь (224). 5.14.4. Примеры расчета коэффициента теплопроводности (225).	

5.15. Коэффициент взаимной диффузии	227
5.15.1. Элементарная кинетическая теория диффузии (227).	
5.15.2. Вычисление коэффициента взаимной диффузии на основе метода Чепмена — Энскога (229).	
5.15.3. Многокомпонентная диффузия (237).	
5.15.4. Примеры расчета коэффициента взаимной диффузии (238).	
5.16. Коэффициент термодиффузии бинарной смеси	240
5.16.1. Элементарная кинетическая теория термодиффузии (240).	
5.16.2. Вычисление коэффициента термодиффузии на основе метода Чепмена — Энскога (243).	
5.17. Закон соответственных состояний	252
5.18. Заключение.	253
Глава 6. Моментный метод Грэда	257
6.1. Общая характеристика моментного метода.	257
6.2. Разложение функции распределения в ряд по полиномам Эрмита	260
6.2.1. Полиномы Эрмита (260).	
6.2.2. Разложение функции распределения (261).	
6.3. Тринадцатимоментное приближение	262
6.4. Сравнение с методом Чепмена — Энскога	266
Глава 7. Аппроксимирующие кинетические уравнения	270
7.1. Введение.	270
7.2. Форма модельных уравнений.	272
7.3. Метод наиболее вероятного распределения	274
7.4. Определение параметров модели	277
7.5. Метод равных моментов	280
7.6. Модельные уравнения для газовых смесей.	283
7.6.1. Модельные уравнения Гамеля (283).	
7.6.2. Линейные аппроксимирующие уравнения (289).	
7.7. Н-теорема для модельных уравнений.	297
7.8. Заключение.	300
Глава 8. Граничные условия	303
8.1. Взаимодействие молекул с поверхностью	303
8.2. Функция распределения на межфазной границе.	305
8.3. Соотношение взаимности	311

8.4. Коэффициенты аккомодации	313
8.5. Модели функции рассеяния	319
8.5.1. Зеркальное отражение (319). 8.5.2. Полная аккомодация (321). 8.5.3. Зеркально-диффузное отражение (322). 8.5.4. CL-модель (324).	
8.6. Закон косинуса	326
8.7. H-теорема для ограниченного газа	327
Глава 9. Теория Онзагера	334
9.1. Формализм теории Онзагера	334
9.1.1. Обобщенные потоки и силы (334). 9.1.2. Кинетические коэффициенты (336). 9.1.3. Принцип минимума производства энтропии (339).	
9.2. Уравнение баланса энтропии	343
9.2.1. Феноменологическая теория (343). 9.2.2. Кинетическая теория (344).	
9.3. Соотношения Онзагера в приближении Чепмена — Энскога	346
9.4. Термомолекулярная разность давлений и механокалорический эффект	352
9.4.1. Интенсивность источника энтропии (353). 9.4.2. Кинетические коэффициенты (358). 9.4.3. Соотношение взаимности (360). 9.4.4. Термомолекулярная разность давлений (368). 9.4.5. Механокалорический эффект (370).	
9.5. Бародиффузионное разделение газовой смеси и диффузионный бароэффект	371
9.5.1. Бародиффузионное разделение смеси (377). 9.5.2. Диффузионный бароэффект (378).	
Глава 10. Режим со скольжением	384
10.1. Режимы переноса	384
10.2. Скольжение и температурный скачок	388
10.3. Модель Максвелла	391
10.3.1. Скольжение (392). 10.3.2. Температурный скачок (398). 10.3.3. Диффузионное скольжение бинарной газовой смеси (401).	
10.4. Модернизированная модель Максвелла	407
10.4.1. Скольжение (407). 10.4.2. Температурный скачок (412). 10.4.3. Диффузионное скольжение (416).	
10.5. Решение задач гидродинамики с учетом кнудсеновского слоя	421
10.5.1. Плоское течение Куэтта (422). 10.5.2. Теплоперенос между пластинами (425). 10.5.3. Движение газа в капил-	

ляре (428). 10.5.4. Задача Стокса (430). 10.5.5. Термофорез (438). 10.5.6. Бинарная смесь в капилляре (444). 10.5.7. Диффузиофорез в бинарной смеси (448).

Глава 11. Свободномолекулярный режим	454
11.1. Теория свободномолекулярного режима переноса	454
11.2. Плоское течение Куэтта	460
11.3. Теплоперенос между пластинами	462
11.4. Движение газа в капилляре	464
11.5. Задача Стокса	470
11.6. Термофорез	474
11.7. Бинарная смесь в капилляре	480
11.8. Диффузиофорез в бинарной смеси	484
Глава 12. Переходный режим	489
12.1. Введение	489
12.2. Общая характеристика методов решения задач динамики разреженного газа в переходном режиме	490
12.3. Дифференциально-моментный метод	492
12.4. Интегральная форма кинетического уравнения	503
12.5. Интегрально-моментный метод	508
12.6. Итерационные схемы	518
12.7. Метод дискретных скоростей	520
Приложение А. Интегралы Пуассона	526
Приложение Б. Уравнения в криволинейных координатах	528
Б.1. Уравнение Больцмана	528
Б.2. Уравнения гидродинамики	528
Приложение В. Приведенные омега-интегралы для потенциала Леннард-Джонса	531
Приложение Г. Выпуклые функции	533
Приложение Д. Интегралы Абрамовица	535
Список литературы	537