

УДК 536.7

Интернет-магазин  
**MATHESIS**  
<http://shop.rcd.ru>

- физика
- математика
- биология
- нефтегазовые технологии



Издание выполнено при частичной финансовой поддержке  
 Удмуртского государственного университета

**Жоу Д., Касас-Баскес Х., Лебон Дж.**

Расширенная необратимая термодинамика. — Москва-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика»; Институт компьютерных исследований, 2006. — 528 с.

Монография представляет собой обширное и доступное введение в современную теорию термодинамики, которая выходит за пределы классической теории неравновесных процессов. Авторами представлены такие направления современной неравновесной термодинамики, как расширенная термодинамика, теория с внутренними переменными, рациональная термодинамика, термодинамика конечного времени, мезоскопическая термодинамика, гамильтонова неравновесная термодинамика, теория информации и т. д. Цель монографии — показать, что результаты, полученные в рамках изучения термодинамики, могут успешно использоваться и в других областях знаний: механике сплошных сред, статистической физике, ядерной физике, космологии, химии, реологии, биологии.

По сравнению с предыдущими это издание существенно переработано, в частности, более четко структурировано. Освещая важнейшие достижения последних лет в данной области, авторы пересматривают такие фундаментальные понятия как энтропия, температура, давление, химический потенциал; ставят новые исследовательские задачи. В третье издание включено более 100 оригинальных задач с подробными решениями, каждая глава снабжена актуальным списком литературы по расширенной неравновесной динамике и смежным областям исследования.

**ISBN 5-93972-569-4**

Translation from the English language edition:

*Extended Irreversible Thermodynamics* by D. Jou, J. Casas-Vázquez, G. Lebon

Copyright © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1993, 1996, 2001

Springer is a part of Springer Science+Business Media

All Rights Reserved

© НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2006

# Оглавление

<b>Предисловие к русскому изданию . . . . .</b>	<b>10</b>
<b>Предисловие к третьему английскому изданию . . . . .</b>	<b>13</b>
<b>Предисловие к первому английскому изданию . . . . .</b>	<b>16</b>

## **ЧАСТЬ I. ОБЩАЯ ТЕОРИЯ 21**

<b>ГЛАВА 1. Классическая и рациональная формулировки неравновесной термодинамики . . . . .</b>	<b>23</b>
1.1. Общие законы баланса физики сплошной среды . . . . .	24
1.2. Закон баланса энтропии . . . . .	33
1.3. Классическая необратимая термодинамика . . . . .	35
1.4. Рациональная термодинамика . . . . .	46
Задачи . . . . .	56

<b>ГЛАВА 2. Расширенная необратимая термодинамика: уравнения эволюции . . . . .</b>	<b>62</b>
2.1. Теплопроводность . . . . .	63
2.2. Однокомпонентная вязкая жидкость . . . . .	71
2.3. Обобщенный поток энтропии и производство энтропии . . . . .	73
2.4. Линеаризованные уравнения эволюции потоков . . . . .	76
2.5. Рациональная расширенная термодинамика . . . . .	78
2.6. Некоторые замечания и перспективы исследований . . . . .	87
2.7. Эволюция энтропии в изолированных системах: иллюстративный пример . . . . .	91
Задачи . . . . .	96

<b>ГЛАВА 3. Расширенная необратимая термодинамика: неравновесные уравнения состояния . . . . .</b>	<b>98</b>
3.1. Физическая интерпретация неравновесной энтропии . . . . .	99
3.2. Неравновесные уравнения состояния: температура . . . . .	102

3.3. Неравновесные уравнения состояния: термодинамическое давление . . . . .	110
3.4. Выпуклость энтропии и устойчивость . . . . .	114
Задачи . . . . .	119
<b>ГЛАВА 4. Формализм Гамильтона . . . . .</b>	<b>121</b>
4.1. Общая формулировка . . . . .	122
4.2. Обратимая и необратимая кинематика . . . . .	126
4.3. Уравнения эволюции в теории РНТ . . . . .	136
Задачи . . . . .	138
 <b>ЧАСТЬ II. МИКРОСКОПИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ . . . . .</b>	 <b>141</b>
<b>ГЛАВА 5. Кинетическая теория газов . . . . .</b>	<b>143</b>
5.1. Основные концепции кинетической теории . . . . .	143
5.2. Неравновесные энтропия и поток энтропии . . . . .	149
5.3. Метод Града . . . . .	150
5.4. Аппроксимации по времени релаксации . . . . .	155
5.5. Разреженный неидеальный газ . . . . .	158
5.6. Нелинейный перенос . . . . .	163
5.7. Разложение коэффициентов переноса с использованием непре- рывных дробей . . . . .	169
Задачи . . . . .	175
<b>ГЛАВА 6. Теория флуктуаций . . . . .</b>	<b>178</b>
6.1. Формула Эйнштейна. Вторые моменты равновесных флукту- аций . . . . .	179
6.2. Идеальные газы . . . . .	184
6.3. Флуктуации и гидродинамический стохастический шум . . . . .	188
6.4. Поток энтропии . . . . .	189
6.5. Радиационный газ . . . . .	191
6.6. Соотношения Онсагера . . . . .	192
Задачи . . . . .	195
<b>ГЛАВА 7. Теория информации . . . . .</b>	<b>199</b>
7.1. Основные концепции . . . . .	200
7.2. Идеальный газ под воздействием теплового потока и вязкого давления . . . . .	205
7.3. Идеальный газ под воздействием потока с градиентом ско- рости: нелинейный анализ . . . . .	207

7.4. Идеальный газ под воздействием теплового потока: нелинейный анализ . . . . .	210
7.5. Релятивистский идеальный газ под воздействием потока энергии . . . . .	211
7.6. Тепловой поток в линейной гармонической цепи . . . . .	214
7.7. Теория информации и неравновесные флуктуации . . . . .	221
Задачи . . . . .	226
<b>ГЛАВА 8. Линейная теория реакций . . . . .</b>	<b>227</b>
8.1. Методы оператора проектирования . . . . .	228
8.2. Уравнения эволюции для простых жидкостей . . . . .	234
8.3. Разложения непрерывных дробей . . . . .	238
Задачи . . . . .	241
<b>ГЛАВА 9. Компьютерное моделирование . . . . .</b>	<b>243</b>
9.1. Компьютерное моделирование неравновесных устойчивых состояний . . . . .	244
9.2. Неравновесные уравнения состояния . . . . .	245
9.3. Зависимость свободной энергии от скорости сдвига: нелинейный анализ . . . . .	250
9.4. Индуцированный сдвигом тепловой поток и нулевой закон . . . . .	252
Задачи . . . . .	255
 <b>ЧАСТЬ III. НЕКОТОРЫЕ ПРИЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ 259</b>	
<b>ГЛАВА 10. Гиперболическая теплопроводность . . . . .</b>	<b>261</b>
10.1. Конечная скорость распространения термальных сигналов. Повторная волна . . . . .	262
10.2. Тепловые импульсы . . . . .	265
10.3. Модели переноса тепла, отличные от уравнений Максвелла–Каттанео . . . . .	271
10.4. Повторная волна при наличии теплового потока . . . . .	277
10.5. Теплопроводность во вращающемся твердом цилиндре . . . . .	279
10.6. Нелинейный перенос тепла: ограничения на тепловой поток . . . . .	281
10.7. Другие приложения . . . . .	283
Задачи . . . . .	286

ГЛАВА 11. <b>Волны в жидкостях</b> . . . . .	292
11.1. Гидродинамические моды в простых жидкостях . . . . .	292
11.2. Поперечные вязкоупругие волны . . . . .	294
11.3. Распространение ультразвука в одноатомных газах . . . . .	296
11.4. Ударные волны . . . . .	305
Задачи . . . . .	314
ГЛАВА 12. <b>Обобщенная гидродинамика</b> . . . . .	317
12.1. Функции корреляции плотности и потока . . . . .	318
12.2. Корреляции спектральной плотности . . . . .	320
12.3. Функция корреляции поперечной скорости: подход РНТ . . . . .	325
12.4. Функция корреляции продольной скорости: подход РНТ . . . . .	330
12.5. Влияние потоков высокого порядка . . . . .	332
Задачи . . . . .	334
ГЛАВА 13. <b>Неклассическая диффузия</b> . . . . .	336
13.1. Расширенная термодинамика диффузии . . . . .	337
13.2. Телеграфное уравнение и стохастические процессы . . . . .	339
13.3. Дисперсия Тейлора . . . . .	344
13.4. Нефиковская диффузия в полимерах . . . . .	349
13.5. Гиперболические РД-системы . . . . .	354
13.6. Микроструктура в быстром затвердевании бинарных сплавов . . . . .	357
Задачи . . . . .	363
ГЛАВА 14. <b>Электрические системы</b> . . . . .	367
14.1. Электрические системы: уравнения эволюции . . . . .	368
14.2. Перекрестные члены в материальных уравнениях: соотношения Онсагера . . . . .	373
14.3. Гидродинамические модели переноса зарядов в полупроводниках и плазме . . . . .	375
14.4. Диэлектрическая релаксация полярных жидкостей . . . . .	383
Задачи . . . . .	387
ГЛАВА 15. <b>Реологические материалы</b> . . . . .	390
15.1. Реологические модели . . . . .	391
15.2. Использование РНТ для описания линейной вязкоупругости . . . . .	397
15.3. Релаксационная модель Роуза–Зимма . . . . .	405
15.4. Описание неньютоновых жидкостей второго порядка с использованием теории РНТ . . . . .	414
Задачи . . . . .	423

<b>ГЛАВА 16. Термодинамика растворов полимеров при наличии потока с градиентом скорости . . . . .</b>	<b>428</b>
16.1. Химический потенциал при наличии сдвига: индуцированные потоком изменения в фазовых диаграммах растворов . .	430
16.2. Явное решение для модели Роуза–Зимма . . . . .	434
16.3. Химические реакции при наличии пластической деформации	440
16.4. Динамический подход . . . . .	444
16.5. Индуцированная сдвигом миграция полимеров . . . . .	447
Задачи . . . . .	452
<b>ГЛАВА 17. Релятивистская формулировка . . . . .</b>	<b>456</b>
17.1. Макроскопическая теория . . . . .	457
17.2. Характеристические скорости . . . . .	461
17.3. Релятивистская кинетическая теория . . . . .	464
17.4. Ядерное вещество . . . . .	468
Задачи . . . . .	470
<b>ГЛАВА 18. Вязкостные космологические модели . . . . .</b>	<b>473</b>
18.1. Использование вязкостных моделей в космологии . . . . .	474
18.2. Образование частиц и эффективная объемная вязкость . . . .	482
18.3. Расширенная термодинамика и космологические событийные горизонты . . . . .	484
18.4. Астрофизические проблемы: гравитационный коллапс . . . .	487
Задачи . . . . .	488
<b>Литература . . . . .</b>	<b>491</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А. Векторные и тензорные обозначения . . . . .</b>	<b>515</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ В. Интегралы, используемые в кинетической теории газов . . . . .</b>	<b>519</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ С. Некоторые физические постоянные . . . . .</b>	<b>520</b>
<b>Предметный указатель . . . . .</b>	<b>521</b>