

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова

С. Б. Московский

**МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА
И ТЕРМОДИНАМИКА**

Учебное пособие

Ярославль
2023

УДК 539.1:536(075.8)

ББК В36я73

М82

Рецензенты:

*А. А. Гвоздев, доктор физико-математических наук, профессор кафедры теоретической физики ФГБОУ ВО "ЯрГУ им. П. Г. Демидова";
Кафедра физики СПбГЭТУ "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)*

Московский, Сергей Борисович.

М82 Молекулярная физика и термодинамика : учебное пособие / С. Б. Московский; Молекулярная физика и термодинамика : учебное пособие / С. Б. Московский; Яросл. гос. ун-т им. П. Г. Демидова. – Ярославль : Филигрань, 2023. – 243 с. – ISBN 978-5-6049339-3-0

Сформулированы фундаментальные представления о равновесии в молекулярных системах и следствия из них. Рассмотрены эмпирические законы идеальных и реальных газов. Раскрыт физический смысл температуры и давления с точки зрения молекулярно-кинетических представлений.

Обоснованы статистические распределения по скоростям и координатам в молекулярных системах. Установлены границы их применимости.

Первое и второе начала термодинамики сформулированы в рамках феноменологического подхода с последующей молекулярно-кинетической интерпретацией. Рассмотрены основные следствия из первого и второго начал термодинамики для однородных систем и систем с равновесными фазами. Показано, что третье начало термодинамики как эмпирический закон приводит к следствиям, которые не могут быть объяснены с позиций классической физики.

Приведены результаты элементарной теории и опыта для поверхностных явлений и явлений переноса.

Описан термодинамический подход к установлению законов равновесного излучения.

Предназначено для студентов физико-математических и инженерных направлений подготовки (уровень бакалавриата).

УДК 539.1:536(075.8)

ББК В36я73

ISBN 978-5-6049339-3-0

© Московский С. Б., 2023

Оглавление

Предисловие	3
Глава 1 Идеальные газы	6
1.1 Закон Авогадро. Количество вещества	6
1.2 Основные положения МКТ и понятие о статистическом равновесии	7
1.3 Модель идеального газа	12
1.4 Эмпирические законы идеальных газов	12
1.4.1 Закон Бойля – Мариотта	12
1.4.2 Идеально-газовая температура	13
1.4.3 Закон Гей-Люссака	16
1.4.4 Уравнение состояния идеального газа	18
1.5 Способы измерения температуры. Термометры	19
Глава 2 Реальные газы	22
2.1 Уравнение Ван дер Ваальса	22
2.2 Закон соответственных состояний	27
Глава 3 Статистические распределения	31
3.1 Вероятности и функции распределения	31
3.2 Распределение Гаусса	35
3.3 Равновесное распределение для составляющих скоростей молекул и давление идеального газа	38
3.4 Равномерное распределение энергии по степеням свободы	43
3.5 Распределение Максвелла	43
3.6 Характерные скорости для распределения Максвелла . .	47
3.7 Распределение Больцмана	49
3.8 Флуктуации макропараметров	54
3.9 Броуновское движение	57
3.10 Опыты Перрена	62
3.11 Принцип детального равновесия	65
3.12 Распределение Максвелла как следствие принципа детального равновесия	69
3.13 Распределение Больцмана (молекулярно-кинетическое обоснование)	71
3.14 Распределение Максвелла по энергиям поступательного движения	74

Глава 4 Основы термодинамики	76
4.1 Термодинамическая температура	76
4.2 Механическая работа и тепло	78
4.3 Первое начало термодинамики	83
4.4 Формулировки и экспериментальные доказательства первого начала термодинамики	87
4.5 Некоторые следствия первого начала термодинамики . .	90
4.6 Политропические процессы	93
4.7 Молекулярно-кинетическая интерпретация первого начала термодинамики	96
4.8 Обратимые и необратимые процессы. Циклы	103
4.9 Постулат Клаузиуса и обратимый цикл Карно	104
4.10 Энтропия. Второе начало термодинамики	109
4.11 Коэффициент полезного действия тепловой машины и теорема Карно	112
4.12 Закон возрастания энтропии в необратимых процессах .	116
4.13 Основное термодинамическое тождество	118
4.14 Уравнения состояния	120
4.15 Теплоемкости и энтропия	123
4.16 Изменения энтропии в необратимых процессах	127
4.17 Циклы Отто и Дизеля	133
4.18 Молекулярно-кинетическая интерпретация второго начала термодинамики	136
4.19 Характеристические функции	143
4.20 Соотношения Максвелла	146
4.21 Общие условия термодинамического равновесия	148
4.22 Эффект Джоуля – Томсона	149
4.23 Теорема Нерста	156
4.24 Системы с переменным числом частиц	161
Глава 5 Равновесие фаз и фазовые переходы	164
5.1 Условия равновесия фаз	164
5.2 Фазовые переходы	169
5.3 Уравнение Клапейрона – Клаузиуса	172
5.4 Критическая точка	173
5.5 Изотермы Ван дер Ваальса и конденсация газов	175
5.6 Сжижение газов при сверхнизких температурах	180
5.7 Поллиморфизм кристаллов	183

Глава 6 Поверхностное натяжение	185
6.1 Силы поверхностного натяжения	185
6.2 Давление под искривленной поверхностью	187
6.3 Краевые углы	190
6.4 Капиллярные явления	192
Глава 7 Явления переноса	197
7.1 Качественное описание явлений переноса	197
7.2 Длина и время свободного пробега	200
7.3 Элементарная теория теплопроводности, диффузии и вязкого трения в газах	203
Глава 8 Термодинамика равновесного излучения	210
8.1 Равновесное тепловое излучение	210
8.2 Абсолютно черное тело	212
8.3 Связь спектральных плотностей энергетической светимости абсолютно черного тела и удельной энергии равновесного излучения	214
8.4 Давление равновесного излучения	217
8.5 Закон Кирхгофа	219
8.6 Законы Стефана – Больцмана и Вина	221
8.7 Уравнения состояния и термодинамические функции равновесного излучения	226
Приложения	229
Приложение 1 Интеграл Пуассона	229
Приложение 2 Интегралы, встречающиеся в задачах на статистические распределения	230
Приложение 3 Произведение трех частных производных с циклической перестановкой	233
Алфавитный указатель	234