

В. А. ОВЧИНКИН

**ЛЕКЦИИ ПО ТЕРМОДИНАМИКЕ
И МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКЕ**

Учебное пособие



Москва
ФИЗМАТКНИГА
2023

ББК 22.36
О35
УДК 53(075)

Рецензенты:

профессор *А. В. Гавриков*, доцент *Д. А. Александров*, ассистент *А. И. Чернышов*

ОВЧИНКИН В. А. Лекции по термодинамике и молекулярной физике. — М.: Физматкнига, 2023. — 240 с. ISBN 978-5-89155-372-9.

Предлагаемая книга, основанная на лекциях, прочитанных автором студентам первого курса Московского физико-технического института (МФТИ), представляет собой систематическое изложение основ классической термодинамики, статистической и молекулярной физики. Книга полностью соответствует программе курса общей физики в МФТИ.

Для студентов технических вузов, изучающих курс общей физики.

ОВЧИНКИН Владимир Александрович

ЛЕКЦИИ ПО ТЕРМОДИНАМИКЕ И МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКЕ

Редактор *А. К. Розанов*

Набор и верстка выполнены в издательстве «Физматкнига»

Операторы *А. К. Розанов, М. А. Шепелев, Н. А. Чугурова*

Издательство «Физматкнига»

141701, Московская область, г. Долгопрудный, ул. Первомайская, д. 5

Тел. (499) 390-51-38

Подписано в печать 18.01.2023. Формат 60×88/16.

Печать цифровая. Усл. печ. л. 18,7. Уч.-изд. л. 18,75. Тираж 300 экз.

Отпечатано в полном соответствии с качеством предоставленных материалов в ООО «Фотоэксперт». 109316, г. Москва, Волгоградский проспект, д. 42, корп. 5, эт. 1, пом. I, ком. 6.3-23Н

Интернет-магазин специализированной литературы **www.fizmatkniga.org**

Уважаемые читатели! Если вы заметили в нашей книге опечатку или ошибку, пожалуйста, сообщите нам об этом по электронной почте publishers@mail.mipt.ru или в группу <https://vk.com/fizmatkniga>. Это поможет сделать следующие издания книги лучше!

ISBN 978-5-89155-372-9



9 785891 553729

© В. А. Овчинкин, 2023

© Физматкнига, 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	7
-------------------	---

ГЛАВА 1

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕРМОДИНАМИКИ И МОЛЕКУЛЯРНОЙ (СТАТИСТИЧЕСКОЙ) ФИЗИКИ.....	8
---	----------

1.1. Агрегатные состояния вещества.....	8
1.2. Термодинамика и статистическая физика	9
1.3. Определения и понятия термодинамики.....	10
1.4. Общее начало термодинамики.....	11
1.5. Квазистатические (равновесные) и неравновесные процессы	12
1.6. Обратимые и необратимые процессы	13

ГЛАВА 2

ИДЕАЛЬНЫЙ ГАЗ. ТЕМПЕРАТУРА.....	15
--	-----------

2.1. Идеальный газ	15
2.2. Давление идеального газа на стенку сосуда.....	15
2.3. Температура.....	17
2.4. Термическое уравнение состояния.....	21
2.5. Внутренняя энергия. Калорическое уравнение состояния	23

ГЛАВА 3

ПЕРВОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ.....	25
---	-----------

3.1. Теплота. Работа	25
3.2. Первое начало термодинамики	26
3.3. Теплоемкость.....	27
3.4. Вычисление теплоемкости идеального газа.....	29
3.5. Политропические процессы	30
3.6. Внутренняя энергия идеального газа. О теплоемкости C_V	30
3.7. О теплоемкости C_P . Энтальпия.....	32
3.8. Скорость звука в изотропных средах.....	32
3.9. Адиабатическое истечение газа через малые отверстия	36

ГЛАВА 4

ВТОРОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ.....	40
---	-----------

4.1. Циклы. Тепловая машина	40
4.2. Возможна ли тепловая машина с одним тепловым резервуаром?.....	42

4.3.	Ни изотерма, ни адиабата.....	43
4.4.	Температура рабочего тела меньше, чем термостата.....	44
4.5.	Температура рабочего тела больше, чем термостата.....	45
4.6.	И это тепловая машина?.....	46
4.7.	Что такое компенсация?.....	47
4.8.	Цикл Карно.....	49
4.9.	Абсолютная термодинамическая шкала температур.....	52
4.10.	Приближение циклами Карно.....	54
4.11.	Термодинамическое определение энтропии.....	56
4.12.	TS -диаграмма. Политропический процесс. КПД обратимого цикла с неизвестным рабочим веществом.....	57
4.13.	Примеры неполитропических процессов.....	60
4.14.	Неравенство Клаузиуса — математическое выражение второго начала термодинамики.....	62
4.15.	Рост энтропии в замкнутых системах.....	63
4.16.	Возрастание энтропии при смешении газов. Парадокс Гиббса.....	65
4.17.	Рост энтропии при тепловом контакте.....	67
4.18.	Максимальная работа, производимая адиабатически изолированной системой над внешними телами.....	67
4.19.	Вычисление изменения энтропии в необратимых процессах.....	71
4.20.	Формулировки второго начала термодинамики.....	74
4.21.	Термодинамический потенциалы.....	75
4.22.	Максимальная работа при контакте тела с термостатом. Максимальная полезная работа.....	79
4.23.	Условия термодинамического равновесия и устойчивости при контакте тела с термостатом.....	81
4.24.	Что происходит с энтропией при температуре $T \rightarrow 0$? Третье начало термодинамики.....	84

ГЛАВА 5

НЕКОТОРЫЕ ПРИЛОЖЕНИЯ ТЕРМОДИНАМИКИ..... 87

5.1.	Термические коэффициенты.....	87
5.2.	Уравнение состояния упругого стержня.....	88
5.3.	Адиабатическое растяжение упругого стержня.....	89
5.4.	Растяжение резины.....	91

ГЛАВА 6

ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ И РАВНОВЕСИЯ..... 93

6.1.	Фазы вещества.....	93
6.2.	Химический потенциал и его непрерывность при фазовых переходах.....	94
6.3.	Фазовый переход вода-пар (испарение).....	97
6.4.	Равновесие в двухфазных системах. Скрытая теплота перехода.....	100
6.5.	Фазовые диаграммы жидкость-пар.....	102
6.6.	Уравнение Клапейрона-Клаузиуса. PT -диаграмма. Тройная точка.....	105
6.7.	Зависимость удельной теплоты фазового перехода испарения жидкости и сублимации от температуры.....	110
6.8.	Теплоемкость насыщенного пара.....	112
6.9.	Цикл паросиловой установки Ренкина.....	114

6.10. Фазовые переходы первого и второго рода	115
6.11. Метастабильные состояния	120

ГЛАВА 7

РЕАЛЬНЫЕ ГАЗЫ 123

7.1. Модель Ван-дер-Ваальса	123
7.2. Уравнение Ван-дер-Ваальса	124
7.3. Внутренняя энергия газа Ван-дер-Ваальса	126
7.4. Энтропия газа Ван-дер-Ваальса	128
7.5. Изотермы газа Ван-дер-Ваальса	128
7.6. Приведенное уравнение Ван-дер-Ваальса	131
7.7. Свойства вещества в критическом состоянии	132
7.8. Дифференциальный эффект Джоуля–Томсона	135
7.9. Интегральный эффект Джоуля–Томсона	140
7.10. Получение низких температур	141

ГЛАВА 8

ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ 143

8.1. Термодинамика поверхностного слоя	144
8.2. Поверхностное давление	145
8.3. Краевой угол	147
8.4. Капиллярные силы	149
8.5. Зависимость давления насыщенного пара от кривизны поверхности ...	150

ГЛАВА 9

СТАТИСТИЧЕСКИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ 155

9.1. Некоторые сведения из теории вероятностей	155
9.2. Биномиальное распределение	159
9.3. Распределение молекул идеального газа по скоростям (распределение Максвелла)	160
Постановка задачи (160). Решение задачи Максвелла (162). Границы применимости распределения Максвелла (166). Среднее число ударов молекул о стенку (167). Средняя кинетическая энергия молекул, вылетающих через малое отверстие в вакуум (169).	
9.4. Распределение Больцмана	170
9.5. Распределение Максвелла–Больцмана	174
9.6. Энтропия и вероятность. Статистический смысл энтропии	175
9.7. Термодинамическая вероятность (статистический вес)	178
9.8. Закон возрастания энтропии. Аддитивность энтропии	182
9.9. Распределение Гиббса как наиболее вероятное распределение	183
9.10. Статистическая температура	187

ГЛАВА 10

НЕКОТОРЫЕ ПРИЛОЖЕНИЯ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ..... 189

- 10.1. Статистическая сумма. Средние величины энергии подсистем 189
 10.2. Флуктуации 191
 Распределение Гаусса (191). Флуктуация температуры (192). Изотермическая и адиабатическая флуктуации объема (194). Флуктуация числа частиц в выделенном объеме (197). Влияние флуктуации на чувствительность пружинных весов (198).
 10.3. Теория теплоемкости 199
 Равномерное распределение энергии по степеням свободы (199). Закон Дюлонга–Пти (201). Классические теплоемкости газов (202). Квантовая теория теплоемкости. Модель Эйнштейна (203). Квантовый ротатор (206). Свойства двухуровневой системы. Инверсная заселенность (207).

ГЛАВА 11

ПРОЦЕССЫ ПЕРЕНОСА..... 211

- 11.1. Столкновение молекул. Длина свободного пробега молекулы 211
 11.2. Распределение молекул по длинам свободного пробега 215
 11.3. Диффузия. Закон Фика 216
 Самодиффузия. Первый закон Фика (216). Нестационарная диффузия. Второй закон Фика (218). Коэффициент диффузии (218). Подвижность частицы. Связь подвижности и коэффициента диффузии (219).
 11.4. Теплопроводность 222
 Закон Фурье (222). Коэффициент теплопроводности (223). Нестационарная теплопроводность. Уравнение теплопроводности (224).
 11.5. Вязкость 227
 11.6. Броуновское движение 229
 Закон Эйнштейна–Смолуховского (230). Случайные блуждания «пьяного матроса» (234). Время выравнивания (235).
 11.7. Явления в разреженных газах 236
 Эффузия разреженного газа (236). Кнудсеновское течение (237). Изотермическая эффузия (238).

ЛИТЕРАТУРА..... 240