

# ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ . . . . .	3
1. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА . . . . .	7
1.1. Формализованное определение термодинамической системы . . . . .	7
1.2. Термодинамическое давление . . . . .	9
1.3. Температура . . . . .	12
1.3.1. <i>Температура и равновесность среды в точке</i> . . . . .	13
1.3.2. <i>Температурные шкалы</i> . . . . .	16
1.3.3. <i>Градиент температурного поля</i> . . . . .	17
1.4. Массовая плотность (удельный объём). . . . .	19
1.5. Равновесное состояния термодинамической системы. . . . .	20
1.5.1. <i>Термическое уравнение состояния</i> . . . . .	21
1.5.2. <i>Термические коэффициенты</i> . . . . .	22
1.6. Неравновесное состояние термодинамической системы . . . . .	23
1.6.1. <i>Процессы переноса</i> . . . . .	24
1.6.2. <i>Релаксация. Время релаксации.</i> . . . . .	25
1.7. Внутренняя энергия термодинамической системы. . . . .	26
1.8. Энтальпия (теплосодержание) термодинамической системы. . . . .	29
2. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ . . . . .	30
2.1. Формализованные определения термодинамического процесса . . . . .	30
2.2. Виды термодинамических процессов. . . . .	31
2.3. Диссипативные процессы и силы . . . . .	33
2.3.1. <i>Диссипация и необратимость</i> . . . . .	34
2.3.2. <i>Необратимость и неравновесность</i> . . . . .	37
2.4. Термодинамический процесс как совокупность двух процессов . . . . .	37
2.4.1. <i>Условие равновесности (и квазиравновесности) процесса</i> . . . . .	38
2.4.2. <i>Возможность замены реального процесса обратимым процессом</i> . . . . .	40
3. РАБОТА И ТЕПЛОТА . . . . .	41
3.1. Формы энергообмена . . . . .	41
3.2. Термодинамическая работа . . . . .	42
3.2.1. <i>Работа сил давления (работа расширения)</i> . . . . .	45
3.2.2. <i>Работа сил вязкого трения (работа диссипации)</i> . . . . .	49
3.2.3. <i>Работа диссипации и работоспособность системы</i> . . . . .	54
3.3. Теплоота (теплообмен). . . . .	55
3.3.1. <i>Теплоёмкость газов</i> . . . . .	58
3.3.2. <i>Истинная и средняя теплоёмкость</i> . . . . .	59

3.3.3. Линейная зависимость теплоёмкости от температуры . . . . .	61
3.3.4. Изохорная и изобарная теплоёмкость газов . . . . .	62
3.3.5. Элементы молекулярно-кинетической квантовой теории теплоёмкости . . . . .	63
4. ПЕРВЫЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ ДЛЯ ЗАКРЫТЫХ СИСТЕМ . . . . .	67
4.1. Закон сохранения энергии для тепловых процессов . . . . .	67
4.2. Первый закон термодинамики для обратимых процессов . . . . .	68
4.3. Первый закон термодинамики для необратимых процессов . . . . .	70
4.4. Сравнение первого закона термодинамики для обратимых и необратимых процессов. . . . .	71
5. ОСНОВНЫЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ИДЕАЛЬНЫХ ГАЗОВ . . . . .	73
5.1. Реальный и идеальный газы . . . . .	73
5.1.1. Идеальный газ. Уравнение Клапейрона . . . . .	73
5.1.2. Уравнение Майера для идеального газа . . . . .	76
5.1.3. Реальный газ. Уравнение Ван дер Ваальса . . . . .	77
5.1.4. Смеси идеальных газов . . . . .	79
5.2. Основные обратимые процессы идеального газа . . . . .	83
5.2.1. Изохорический процесс . . . . .	84
5.2.2. Изобарический процесс . . . . .	85
5.2.3. Изотермический процесс . . . . .	87
5.2.4. Адиабатический процесс . . . . .	88
5.3. Политропные процессы . . . . .	90
5.3.1. Уравнение политропы . . . . .	91
5.3.2. Теплоёмкость в политропном процессе . . . . .	92
5.3.3. $p$ - $v$ -диаграммы политропных процессов . . . . .	94
5.3.4. Три группы политропных процессов . . . . .	96
6. КРУГОВЫЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ (ЦИКЛЫ). . . . .	98
6.1. Виды циклов . . . . .	98
6.2. Прямой цикл. Термический КПД. . . . .	100
6.3. Обратный цикл. Холодильный коэффициент. . . . .	102
6.4. Предельные циклы (циклы Карно) . . . . .	104
6.4.1. Принципы построения предельных циклов . . . . .	105
6.4.2. Прямой цикл Карно . . . . .	106
6.4.3. Обратный цикл Карно . . . . .	110
6.5. Регенеративный цикл (цикл Стерлинга). . . . .	114
6.6. Свойства обратимых и необратимых циклов . . . . .	117

6.6.1. Обратимый цикл. Первый интеграл Клаузиуса . . . . .	118
6.6.2. Необратимый цикл. Второй интеграл Клаузиуса . . . . .	120
7. ВТОРОЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ. . . . .	121
7.1. Необходимость второго закона термодинамики . . . . .	121
7.2. Энтропия . . . . .	124
7.3. Обобщение первого и второго закона термодинамики . . . . .	125
7.4. Принцип возрастания энтропии . . . . .	127
7.5. Энтропия и работоспособность системы . . . . .	129
7.6. Изменение энтропии идеального газа . . . . .	131
7.7. Тепловая $TS$ -диаграмма. . . . .	133
7.8. Изменение энтропии в обратимых процессах идеального газа . . . . .	134
7.9. $TS$ -диаграммы циклов . . . . .	138
7.10. Обобщённое определение энтропии . . . . .	140
7.11. Изменение энтропии в необратимых процессах. . . . .	143
7.12. Анализ необратимых процессов . . . . .	144
7.13. Необратимые циклы . . . . .	148
<i>Библиографический список</i> . . . . .	152

*Шалимов Виталий Петрович*

## **Основы теплотехники**

### **Часть I**

#### **Техническая термодинамика**

Редактор *В. В. Митрохина*

Корректор *Л. А. Петрова*

Компьютерная верстка *Н.В. Стасеева*

Подписано в печать 10.06.2024. Формат 60×84/16. Бумага документная

Печать цифровая. Усл. печ. л. 9. Тираж 500 экз. Заказ № 175.

Издательство БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова

190005, С-Петебург, 1-я Красноармейская ул., д. 1