

А. А. ГАЖУР

**ТЕПЛОТЕХНИКА.
ТЕПЛОПЕРЕДАЧА
И ТЕРМОДИНАМИКА**



«Инфра-Инженерия»

А. А. ГАЖУР

**ТЕПЛОТЕХНИКА.
ТЕПЛОПЕРЕДАЧА
И ТЕРМОДИНАМИКА**

Учебник

Москва Вологда
«Инфра-Инженерия»
2023

11

УДК 621.1.016

ББК 31.31

Г12

Рецензенты:

д-р техн. наук (РЭУ им. Г. В. Плеханова) *А. В. Быстров*;

канд. техн. наук (ФГАНУ «ВНИМИ») *П. В. Кузнецов*

Гажур, А. А.

Г12 · Теплотехника. Теплопередача и термодинамика : учебник / А. А. Гажур. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2023. – 312 с. : ил., табл.
ISBN 978-5-9729-1174-5

Освещаются основные положения теории теплопроводности, тепловые и холодильные процессы, термодинамические процессы и циклы. Уделено внимание практическим приложениям и решениям тепловых задач по теплопроводности и теплопередаче через многослойные стенки, теплоотдаче жидкости или газа при разных режимах и условиях течения, излучению между бесконечными пластинами, в замкнутом пространстве и др. Рассмотрены показатели энергоэффективности тепловых процессов и оборудования.

Для студентов, обучающихся по направлению 15.03.02 «Технологические машины и оборудование», профили «Инжиниринг высокотехнологического оборудования», «Инженер-экономист».

УДК 621.1.016

ББК 31.31

ISBN 978-5-9729-1174-5

© Гажур А. А., 2023

© Издательство «Инфра-Инженерия», 2023

© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	8
----------------	---

ЧАСТЬ I. ТЕПЛОПЕРЕДАЧА

Глава 1. ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ	10
1.1. Теплообмен. Его виды	10
1.2. Температурное поле. Теплопроводность	10
1.3. Коэффициент теплопроводности	15
1.4. Особенности теплопроводности в разных средах	18
1.5. Дифференциальное уравнение теплопроводности	19
1.6. Принцип решения тепловой задачи. Источники теплоты. Краевые условия (начальное условие и граничные условия: ГУ I–IV рода)	23
1.7. Теплопроводность при стационарном режиме для случая трёхмерного потока тепла	28
1.8. Теплопроводность через плоскую стенку при стационарном режиме	29
1.9. Теплопроводность через цилиндрическую стенку	33
1.10. Теплопроводность через шаровую стенку	37
1.11. Дифференциальные уравнения в частных производных	39
1.12. Метод разделения переменных (метод Фурье)	40
Глава 2. ТЕПЛОТДАЧА ИЛИ КОНВЕКЦИЯ	51
2.1. Коэффициент теплоотдачи	51
2.2. Режимы движения жидкости	52
2.3. Вязкость	54
2.4. Теория подобия	56
2.5. Турбулентное движение жидкости или газа внутри гладких труб	60
2.6. Ламинарное движение потока жидкости внутри гладких труб	61
2.7. Теплоотдача в неограниченном пространстве	62
2.8. Теплоотдача в ограниченном пространстве	64
2.9. Теплоотдача при поперечном омывании цилиндра	66
2.10. Теплоотдача при омывании пучков труб	68
2.11. Теплоотдача при конденсации пара	71
2.12. Теплоотдача при кипении	74
2.13. Вывод критерия Нуссельта	79
2.14. Уравнение Навье – Стокса	79
Глава 3. ИЗЛУЧЕНИЕ	82
3.1. Спектр излучения. Инфракрасное излучение	82
3.2. Свойства тел относительно излучения. Абсолютно черное тело	83
3.3. Основные законы теплового излучения (Планка, Стефана – Больцмана, Вина, Ламберта, Кирхгофа). Закон Планка	85
3.4. Теплообмен излучением между телами	91
3.5. Поглощение излучения газами и излучение газов	97

Глава 4. СЛОЖНЫЙ ТЕПЛОБМЕН	99
4.1. Эквивалентная теплоотдача.....	99
4.2. Эквивалентное излучение.....	102
Глава 5. ТЕПЛОПЕРЕДАЧА	103
5.1. Уравнение теплопередачи. Коэффициент теплопередачи.....	103
5.2. Теплопередача через плоскую стенку.....	103
5.3. Теплопередача через цилиндрическую стенку.....	105
5.4. Теплопередача через шаровую стенку.....	107
5.5. Теплообменные аппараты.....	106
Глава 6. ПОКАЗАТЕЛИ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ	112
6.1. Применяемые и предлагаемые показатели энергетической эффективности.....	112
6.2. Безразмерные показатели энергетической эффективности.....	112
Список литературы к части I	116

ЧАСТЬ II. ТЕРМОДИНАМИКА

РАЗДЕЛ 1. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ	118
Глава 7. ИДЕАЛЬНЫЙ ГАЗ. ПАРАМЕТРЫ СОСТОЯНИЯ	118
7.1. Основные определения.....	118
7.2. Идеальный газ. Параметры состояния.....	119
Глава 8. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ. УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА	124
8.1. Термодинамическая система.....	124
8.2. Классификация термодинамических систем.....	124
8.3. Поверхность термодинамических процессов.....	125
8.4. Уравнение состояния идеального газа.....	127
Глава 9. ЗАКОН АВОГАДРО. КИЛОМОЛЬ. ГАЗОВАЯ ПОСТОЯННАЯ. ГАЗОВЫЕ СМЕСИ	129
9.1. Закон Авогадро. Киломоль.....	129
9.2. Определение величины газовой постоянной.....	129
9.3. Газовые смеси.....	130
Глава 10. ТЕПЛОЕМКОСТЬ	135
10.1. Теплоемкость. Постоянная теплоемкость.....	135
10.2. Переменная теплоемкость.....	138

10.3. Истинная теплоемкость.....	139
10.4. Средняя теплоемкость.....	139
10.5. Теплоемкость газовой смеси.....	141

Глава 11. ГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ. P_v-ДИАГРАММА. ПЕРВЫЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ 142

11.1. Графический метод исследования термодинамических процессов. P _v -диаграмма.....	142
11.2. Внутренняя энергия состояния тела (газа).....	143
11.3. Работа в термодинамическом процессе.....	145
11.4. Первый закон термодинамики.....	146

Глава 12. ИЗОПРОЦЕССЫ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ГАЗА. ИЗОХОРНЫЙ И ИЗОБАРНЫЙ ПРОЦЕССЫ. УРАВНЕНИЕ МАЙЕРА 147

12.1. Изопроцессы изменения состояния газа.....	147
12.2. Изохорный процесс.....	148
12.3. Изобарный процесс.....	150
12.4. Уравнение Майера.....	152

Глава 13. ЭНТАЛЬПИЯ. ПЕРВЫЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭНТАЛЬПИИ. ИЗОТЕРМИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС 153

13.1. Энтальпия (теплосодержание).....	153
13.2. Первый закон термодинамики с использованием энтальпии.....	154
13.3. Изотермический процесс.....	158

Глава 14. АДИАБАТНЫЙ ПРОЦЕСС. ПОЛИТРОПНЫЙ ПРОЦЕСС 160

14.1. Адиабатный процесс.....	160
14.2. Политропный процесс изменения состояния идеального газа.....	163

Глава 15. ЭНТРОПИЯ. T_s-ДИАГРАММА. ПЕРЕНОС ПРОЦЕССОВ ИЗ P_v-ДИАГРАММЫ В T_s-ДИАГРАММУ 167

15.1. Энтропия. T _s -диаграмма.....	167
15.2. Перенос процессов из P _v - в T _s -диаграмму.....	175

РАЗДЕЛ 2. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ЦИКЛЫ 177

Глава 16. ВТОРОЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ. ТЕРМИЧЕСКИЙ КОЭФФИЦИЕНТ. ЦИКЛ И ТЕОРЕМА КАРНО. ОБРАТНЫЙ ЦИКЛ КАРНО. ХОЛОДИЛЬНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ 177

16.1. Второй закон термодинамики.....	177
---------------------------------------	-----

16.2. Термический коэффициент	178
16.3. Цикл Карно. Теорема Карно	182
16.4. Обратный цикл Карно. Холодильный коэффициент.....	187

Глава 17. ЭНТРОПИЯ В ЦИКЛИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ.

УРАВНЕНИЕ КЛАУЗИУСА. ОСНОВНОЕ

УРАВНЕНИЕ ТЕРМОДИНАМИКИ.

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ЭНТРОПИИ 189

17.1. Энтропия в циклическом процессе. Уравнение Клаузиуса	189
17.2. Основное уравнение термодинамики	193
17.3. Статистическая интерпретация энтропии	193

Глава 18. ВОДА И ВОДЯНОЙ ПАР. ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ.

РТ-, Рv- и Ts-ДИАГРАММЫ ВОДЯНОГО ПАРА.

ПАРАМЕТРЫ СОСТОЯНИЯ ВОДЯНОГО ПАРА.

ВОДЯНОЙ ПАР В Is-ДИАГРАММЕ 194

18.1. Вода и водяной пар	194
18.2. Фазовые переходы. РТ-диаграмма	199
18.3. Рv- и Ts-диаграммы водяного пара. Параметры состояния водяного пара.....	201
18.4. Водяной пар в Is-диаграмме.....	209

Глава 19. ВЛАЖНЫЙ ВОЗДУХ. Рv-ДИАГРАММА ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА.

ТОЧКА РОСЫ. АБСОЛЮТНАЯ И ОТНОСИТЕЛЬНАЯ ВЛАЖНОСТЬ.

ВЛАГОСОДЕРЖАНИЕ. id-ДИАГРАММА ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА 214

19.1. Влажный воздух	214
19.2. Влажный воздух в Рv-диаграмме. Точка росы.....	215
19.3. Абсолютная и относительная влажность	217
19.4. Влажность	219
19.5. Влажный воздух в id-диаграмме	221

Глава 20. ИДЕАЛЬНЫЕ ЦИКЛЫ ТЕПЛОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ОТТО,

ДИЗЕЛЯ И ТРИНКЛЕРА. СРАВНЕНИЕ ИХ ЭФФЕКТИВНОСТИ.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕАЛЬНЫХ ЦИКЛОВ 224

20.1. Циклы тепловых двигателей.....	224
20.2. Цикл Отто	226
20.3. Цикл Дизеля.....	228
20.4. Цикл Тринклера	230
20.5. Сравнение эффективности идеальных циклов.....	232
20.6. Эффективность реальных циклов.....	237

Глава 21. КОМПРЕССОР. КЛАССИФИКАЦИЯ КОМПРЕССОРОВ.

ОДНОСТУПЕНЧАТЫЙ, ДВУХСТУПЕНЧАТЫЙ

И МНОГОСТУПЕНЧАТЫЙ КОМПРЕССОРЫ..... 240

21.1. Компрессор. Классификация компрессоров	240
21.2. Одноступенчатый компрессор.....	240
21.3. Двухступенчатый компрессор.....	246
21.4. Многоступенчатый компрессор	250

Глава 22. ХОЛОДИЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ. ИХ ЦИКЛЫ. ДРОССЕЛИРОВАНИЕ. БЫТОВОЙ ХОЛОДИЛЬНИК. АБСОРБЦИОННАЯ ХОЛОДИЛЬНАЯ УСТАНОВКА. ТЕПЛОВОЙ НАСОС 252

22.1. Холодильные установки.	252
22.2. Дросселирование. Уравнение первого закона термодинамики для потока газа. Дифференциальный и интегральный эффект Джоуля – Томсона	260
22.3. Бытовой холодильник.....	263
22.4. Абсорбционная холодильная установка	264
22.5. Тепловой насос	266

Глава 23. ЦИКЛ РЕНКИНА. ОБОБЩЕННЫЙ ЦИКЛ ТЕПЛОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ. ИНДИКАТОРНАЯ ДИАГРАММА. ГАЗОВАЯ ТУРБИНА. ТЕПЛОВАЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ. ТЕПЛОФИКАЦИЯ..... 269

23.1. Цикл Ренкина.....	269
23.2. Обобщенный термодинамический цикл тепловых двигателей.....	273
23.3. Индикаторная диаграмма	276
23.4. Газовая турбина.....	277
23.5. Тепловая электростанция. Теплофикация	279

Глава 24. ЭКСЕРГИЯ. ЭНТРОПИЯ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ ВЕРОЯТНОСТЬ. НУЛЕВОЕ И ТРЕТЬЕ НАЧАЛА ТЕРМОДИНАМИКИ..... 283

24.1. Эксергия	283
24.2. Энтропия и термодинамическая вероятность	287
24.3. Нулевое начало термодинамики (общее начало термодинамики). Третье начало термодинамики (теорема Нернста).....	291

Список литературы к части II 292

ЗАКЛЮЧЕНИЕ..... 293

ПРИЛОЖЕНИЕ 295