

ББК 31.31я73

Ц 68

Цирельман Н. М.

Ц 68 Техническая термодинамика: Учебное пособие. — 2-е изд., доп. — СПб.: Издательство «Лань», 2021. — 352 с.: ил. — (Учебники для вузов. Специальная литература).

ISBN 978-5-8114-3063-5

Изложены понятия и законы (основания) термодинамики. Показаны закономерности преобразования теплоты в механическую работу в обратимых циклах газовых и паровых тепловых двигателей, а также в установках умеренного и глубокого холода. Кратко даны необходимые сведения о химических взаимодействиях и фазовых переходах в свете работ Д. Гиббса.

Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по программам бакалавриата и магистратуры направлений «Ракетные комплексы и космонавтика», «Баллистика и гидроаэродинамика», «Авиационное», «Двигатели летательных аппаратов» и программам специалитета «Проектирование, производство и эксплуатация ракет и ракетно-космических комплексов», «Проектирование авиационных и ракетных двигателей», «Испытание летательных аппаратов», «Самолето- и вертолетостроение». Может быть полезно при подготовке бакалавров и магистров других направлений.

ББК 31.31я73

Рецензенты:

Ю. Ф. ГОРТЫШОВ — доктор технических наук, профессор кафедры теплотехники и энергетического машиностроения Казанского национального исследовательского технического университета им. А. Н. Туполева;
С. Ф. УРМАНЧЕЕВ — доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории механики многофазных сред Института механики им. Р. Р. Мавлютова Уфимского научного центра РАН.

Обложка

Е. А. ВЛАСОВА

- © Издательство «Лань», 2021
- © Н. М. Цирельман, 2021
- © Издательство «Лань», художественное оформление, 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	7
1. ПЕРВЫЙ ЗАКОН (ПЕРВОЕ НАЧАЛО) ТЕРМОДИНАМИКИ.....	11
1.1. Основные понятия термодинамики.....	11
1.2. Особенности технической термодинамики как науки.....	16
1.3. Первое начало (первый закон) термодинамики.....	17
1.4. Термодинамические параметры. Энтропия и термодинамическая вероятность.....	20
1.5. Уравнение состояния системы.....	23
1.6. Критерий стабильности (критерий устойчивости) термодинамической системы.....	25
1.7. Количественная мера энергетического воздействия на систему.....	28
1.8. Газовые смеси.....	32
1.8.1. Смеси идеальных газов.....	32
2. ВТОРОЙ ЗАКОН (ВТОРОЕ НАЧАЛО) ТЕРМОДИНАМИКИ.....	36
2.1. Равновесное взаимодействие системы с окружающей средой.....	36
2.2. Неравновесное взаимодействие системы с окружающей средой. Второй закон термодинамики в формулировке Р. Клаузиуса.....	40
2.3. Соотношение между первым и вторым законами термодинамики.....	44
2.4. Второй закон термодинамики в формулировке М. Планка.....	45
3. ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ ТЕРМОДИНАМИКИ (ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПОТЕНЦИАЛЫ).....	48
3.1. Характеристические функции термодинамики и дифференциальные соотношения.....	48
3.2. Применение дифференциальных соотношений термодинамики к изучению характеристических функций.....	52
3.3. Термодинамические потенциалы.....	56
3.4. Химический потенциал (потенциал химического взаимодействия и фазового перехода).....	59
4. ТЕПЛОЕМКОСТИ В ТЕРМОДИНАМИКЕ.....	61
4.1. Определение теплоемкостей и их взаимосвязь.....	61
4.2. Зависимость теплоемкостей c_v и c_p от термодинамических параметров p и v	63
4.3. Зависимость теплоемкостей c_v и c_p от температуры.....	66
4.4. Расчет изменения внутренней энергии и энтальпии вещества. Соотношение Р. Майера.....	68
4.5. О границах использования теплоемкости в уравнении первого закона термодинамики.....	71
5. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ.....	74
5.1. Квазистатические (обратимые) политропный и основные процессы.....	74
5.1.1. Определение показателя политропы.....	74

5.1.2. Связь между параметрами системы на линии политропного и основных процессов.....	76
5.2. Расчет работы в политропном и в основных процессах.....	78
5.3. Применение первого закона термодинамики к основным термодинамическим процессам.....	80
5.4. Расчет количества теплоты в политропном и в основных процессах.....	81
5.5. Расчет изменения энтропии в политропном и в основных процессах.....	83
5.6. Графическое изображение политропного и основных процессов.....	84
5.7. Термодинамические процессы с влажным воздухом.....	90
5.7.1. Основные характеристики влажного воздуха.....	90
5.7.2. Диаграмма $H - d$ для состояний влажного воздуха и процессов их изменения.....	93
6. ЭЛЕМЕНТЫ ТЕРМОДИНАМИКИ ПОТОКА.....	97
6.1. Постановка задачи исследования.....	97
6.2. Первый закон термодинамики для потока.....	98
6.3. Расчет работы сил давления. Механическая форма первого закона термодинамики для потока.....	99
6.4. Первый закон термодинамики для адиабатного потока в неподвижном канале.....	102
6.5. Термическая форма первого закона термодинамики для потока.....	103
6.6. Скорость потока в произвольном сечении неподвижного канала.....	105
6.7. Распределение плотности потока массы по длине канала.....	107
6.8. Особенности распространения звуковых (акустических) возмущений в потоке.....	111
6.9. Кинематический анализ течения в сопле Лавала.....	112
6.10. Особенности адиабатного течения в подвижном канале. Расчет технической работы.....	115
6.11. Дросселирование (мятие) потока.....	118
6.12. Вихревой эффект Ранка – Хилла.....	123
7. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РЕАЛЬНЫХ ВЕЩЕСТВ.....	127
7.1. Макроструктура реальных веществ. Правило фаз Гиббса.....	127
7.2. Термические коэффициенты и их взаимосвязь с уравнениями состояния вещества.....	130
7.3. Сравнение свойств идеального и реальных газов.....	136
7.4. Изотермы Ван-дер-Ваальса и Эндриуса. Критическое состояние вещества. Фазовая диаграмма $p-t$	139
7.5. Уравнения Клапейрона – Клаузиуса и Пойнтинга.....	144
8. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТЫ ТЕПЛООВОГО ДВИГАТЕЛЯ.....	147
8.1. Круговые процессы (циклы).....	147
8.2. Цикл Карно.....	150
8.3. Цикл Карно как калориметрический термометр. Абсолютная (термодинамическая) шкала температуры.....	155
8.4. Цикл Стирлинга.....	159

9. РАСЧЕТ ПОТЕРЬ РАБОТОСПОСОБНОСТИ. ЭКСЕРГИЯ.....	164
9.1. Энтропийный метод анализа потерь из-за необратимости.....	164
9.2. Эксергетический метод анализа потерь из-за необратимости.....	167
10. ОБРАТИМЫЕ ЦИКЛЫ ГАЗОВЫХ ТЕПЛОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ.....	175
10.1. Индикаторная диаграмма поршневого теплового двигателя.....	175
10.2. Отличие действительных и обратимых циклов газовых тепловых двигателей.....	176
10.3. Циклы поршневых двигателей внутреннего сгорания (циклы ДВС).....	177
10.3.1. Схема работы бензинового двигателя.....	177
10.3.2. Обратимый цикл ДВС с изохорным подводом теплоты (цикл Отто).....	179
10.3.3. Обратимый цикл ДВС с изобарным подводом теплоты (цикл Дизеля).....	181
10.3.4. Обратимый цикл ДВС со смешанным подводом теплоты (цикл Тринклера – Сабатэ).....	183
10.4. Циклы газотурбинных установок (циклы ГТУ).....	185
10.4.1. Схема работы ГТУ.....	185
10.4.2. Обратимый цикл ГТУ с изобарным подводом теплоты.....	186
10.4.3. Обратимый цикл ГТУ с изохорным подводом теплоты.....	188
10.4.4. Регенеративный цикл ГТУ.....	191
10.5. Циклы воздушно-реактивных двигателей (циклы ВРД).....	193
10.5.1. Схемы работы ВРД.....	193
10.5.2. Обратимый цикл прямого ВРД с изобарным подводом теплоты.....	197
10.5.3. Обратимый цикл ПВРД с изохорным подводом теплоты.....	197
10.5.4. Обратимый цикл ТРД с изобарным подводом теплоты (цикл Брайтона).....	198
10.5.5. Обратимый цикл ТРД с изохорным подводом теплоты (цикл Хамфри).....	199
10.5.6. Цикл ТРД с дополнительным подводом теплоты (с форсажем).....	201
10.5.7. Обратимый цикл ракетного двигателя.....	202
11. ОБРАТИМЫЙ ЦИКЛ КОМПРЕССОРА.....	204
11.1. Обратимый цикл одноступенчатого поршневого компрессора.....	205
11.2. Обратимый цикл многоступенчатого поршневого компрессора.....	208
11.3. Влияние вредного пространства на работу поршневого компрессора.....	211
12. ЦИКЛЫ ПАРОСИЛОВЫХ УСТАНОВОК.....	215
12.1. Фазовые состояния однокомпонентных веществ.....	215
12.2. Построение диаграмм состояния для воды и водяного пара.....	216
12.2.1. Построение диаграммы состояния для воды и водяного пара в $p - V$ -координатах.....	216
12.2.2. Построение диаграмм состояния для воды и водяного пара в $t - s$ - и $h - s$ -координатах.....	218

12.3. Паросиловой цикл Карно.....	224
12.4. Паросиловой цикл Ренкина.....	226
12.5. Регенеративный цикл паротурбинных установок.....	233
12.6. Бинарный цикл паросиловой установки.....	239
12.7. Парогазовые циклы.....	244
13. ОБРАТНЫЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ЦИКЛЫ.....	247
13.1. Рабочие вещества холодильных машин (хладагенты).....	247
13.2. Цикл Карно для холодильных машин.....	249
13.3. Обратимый цикл газовой холодильной машины.....	250
13.4. Цикл парокомпрессионной холодильной машины.....	254
13.5. Циклы тепловых насосов.....	261
13.6. Термодинамические основы производства глубокого холода.....	265
13.6.1. Цикл с дросселированием (цикл Линде).....	266
13.6.2. Цикл с расширением (цикл Клода).....	268
13.6.3. Цикл Капицы для сжижения воздуха.....	270
13.6.4. Цикл Капицы для сжижения гелия.....	271
14. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ХИМИЧЕСКИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ И ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ. ТЕПЛОВАЯ ТЕОРЕМА НЕРСТА.....	274
14.1. Особенности химических взаимодействий и фазовых переходов.....	274
14.2. Анализ процессов перераспределения массы.....	275
14.3. Уравнения равновесия при наличии химических взаимодействий и фазовых переходов.....	276
14.4. Термодинамический анализ химически реагирующей смеси газов.....	280
14.4.1. Термодинамический потенциал газовой смеси.....	280
14.4.2. Потенциал химического взаимодействия в потоке.....	282
14.4.3. Закон действующих масс.....	284
14.5. Термодинамический анализ фазового перехода при кипении жидкости.....	286
14.6. Тепловая теорема Нерста. Третий закон термодинамики.....	290
14.7. Доказательство тепловой теоремы Нерста и следствий из нее.....	293
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ.....	301
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	309
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	350

Светлой памяти Учителя, профессора
Александра Адольфовича Гухмана,
выдающегося теплофизика современности,
посвящаю
Автор

ВВЕДЕНИЕ

Техническая термодинамика как наука зародилась и прошла стадию начального становления при решении проблемы теплового двигателя, когда возникла необходимость исследовать закономерности непрерывного преобразования теплоты (термического воздействия) в работу (в деформационное воздействие) с помощью так называемого рабочего тела (системы).

Фундаментальной основой термодинамики стал закон сохранения и превращения энергии – первый закон (первое начало) термодинамики. Он входит в объем предварительных знаний для этой научной дисциплины, так как является общим физическим принципом. Его формулировке в приложениях для термодинамики мы обязаны в основном исследованиям выдающихся ученых Р. Майера и Д. Джоуля, установившим эквивалентность теплоты и работы.

Первый закон термодинамики позволил выразить всю сумму количеств энергетических воздействий, исходящих из внешней (окружающей) среды, через изменение внутренней энергии системы.

Огромный вклад в становление термодинамики внес Р. Клаузиус, который рассмотрел с материалистических позиций идеи С. Карно о работе теплового двигателя. При этом было установлено понятие энтропии и обоснован второй закон (второе начало) термодинамики о характере протекания равновесных и неравновесных взаимодействий системы с окружающей средой. Практически одновременно с Р. Клаузиусом сформулировал второй закон термодинамики и В. Томсон, который ввел в научную практику положение о рассеивании (диссипации) энергии направленных форм движения. Он обосновал существование абсолютной (термодинамической) температурной шкалы, которая не зависит от свойств термометрического вещества и процедуры проведения измерений.

Прямым следствием использования первого и второго законов термодинамики явилось создание оригинального математического