



**В.А. КУДИНОВ, Э.М. КАРТАШОВ, Е.В. СТЕФАНЮК**

# **ТЕПЛОТЕХНИКА**

**УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ**

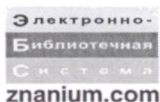
**Э**лектронно-  
**Б**иблиотечная  
**С**истема  
[znanium.com](http://znanium.com)

**В.А. КУДИНОВ, Э.М. КАРТАШОВ,  
Е.В. СТЕФАНЮК**

# **ТЕПЛОТЕХНИКА**

**УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ**

*Рекомендовано Научно-методическим советом по теплотехнике  
Министерства образования и науки Российской Федерации в качестве  
учебного пособия для студентов высших учебных заведений,  
обучающихся по направлению подготовки бакалавров и магистров  
в области технических наук и по направлениям подготовки  
дипломированных специалистов в области техники и технологии*



*Соответствует  
Федеральному государственному  
образовательному стандарту  
3-го поколения*

**МОСКВА  
КУРС  
ИНФРА-М  
2020**

УДК 536.2 (075) 46 (075.8)  
ББК 31.31  
К 88

ФЗ  
№ 436-ФЗ

Издание не подлежит маркировке  
в соответствии с п. 1 ч. 4 ст. 11

**Рецензенты:**

*П.Г. Алексеев* — д-р техн. наук, проф. (кафедра «Процессы и аппараты химической технологии» МИТХТ им. М.В. Ломоносова)

*А.А. Валишин* — д-р физ.-мат. наук, проф. (кафедра «Прикладная математика» МВТУ им. Н.Э. Баумана)

**Кудинов В.А., Карташов Э.М., Стефанюк Е.В.**

**К 88** Теплотехника: Учеб. пособие / В.А. Кудинов, Э.М. Карташов, Е.В. Стефанюк — М.: КУРС: ИНФРА-М, 2020. — 424 с., ил. (Высшее образование).

ISBN 978-5-905554-80-3 (КУРС)

ISBN 978-5-16-010393-8 (ИНФРА-М, print)

В первой части книги рассмотрены основные законы термодинамики, процессы сжатия в компрессорах, циклы двигателей внутреннего сгорания, газотурбинных и паротурбинных установок, циклы холодильных машин. Рассмотрен эксергетический метод анализа теплоэнергетических установок.

Во второй части книги изложены инженерные методы построения решений задач стационарной и нестационарной теплопроводности, позволяющие получать достаточно эффективные аналитические решения для однослойных и составных конструкций.

С помощью интегрального метода теплового баланса на основе введения фронта температурного возмущения и при использовании дополнительных граничных условий получены аналитические решения задач теплопроводности с переменными начальными условиями, переменными во времени граничными условиями и внутренними источниками теплоты, нелинейных задач теплопроводности, задач теплопроводности для многослойных конструкций, а также задач теплообмена в жидкостях, включая динамический и тепловой пограничные слои.

Для студентов вузов, научно-технических работников, специализирующихся в области математики, теплофизики, теплотехники, а также для специалистов в области расчетов и проектирования композиционных материалов.

**УДК 536.2 (075) 46 (075.8)**  
**ББК 31.31**

ISBN 978-5-905554-80-3 (КУРС)  
ISBN 978-5-16-010393-8 (ИНФРА-М, print)

© Коллектив авторов, 2011  
© КУРС, 2015

# Оглавление

Введение . . . . .	3
--------------------	---

## ЧАСТЬ I

<b>Глава 1. Первый закон термодинамики. Основные понятия и определения</b> . . . . .	<b>5</b>
§ 1.1. Термодинамическая система и окружающая среда . . . . .	5
§ 1.2. Основные термодинамические параметры состояния . . . . .	6
§ 1.3. Термодинамический процесс . . . . .	10
§ 1.4. Уравнение состояния . . . . .	12
§ 1.5. Уравнения состояния реальных газов . . . . .	15
§ 1.6. Энергия. Внутренняя энергия . . . . .	19
§ 1.7. Теплота и работа . . . . .	20
§ 1.8. Первый закон термодинамики . . . . .	21
<b>Глава 2. Второй закон термодинамики</b> . . . . .	<b>26</b>
§ 2.1. Энергия и энтропия . . . . .	26
§ 2.2. Равновесность и обратимость процессов . . . . .	28
§ 2.3. Условия работы тепловых машин . . . . .	29
§ 2.4. Цикл Карно . . . . .	31
§ 2.5. Обратный обратимый цикл Карно . . . . .	36
§ 2.6. Метод циклов. Открытие энтропии как функции состояния . . . . .	37
§ 2.7. Общая математическая формулировка второго закона термодинамики . . . . .	41
§ 2.8. Физический смысл и свойства энтропии . . . . .	43
§ 2.9. Обобщенный термодинамический цикл Карно. Регенерация теплоты . . . . .	46
§ 2.10. Эксергетический метод исследования . . . . .	47
§ 2.11. Эксергия теплоты . . . . .	49
<b>Глава 3. Компрессорные машины</b> . . . . .	<b>51</b>
§ 3.1. Процессы сжатия в компрессорных машинах . . . . .	51
§ 3.2. Мощность привода и коэффициенты полезного действия компрессора . . . . .	56
§ 3.3. Многоступенчатый компрессор . . . . .	57
<b>Глава 4. Циклы поршневых двигателей внутреннего сгорания</b> . . . . .	<b>60</b>
§ 4.1. Краткие исторические сведения . . . . .	60
§ 4.2. Циклы ДВС с подводом теплоты при постоянном объеме . . . . .	61

§ 4.3. Циклы ДВС с подводом теплоты при постоянном давлении. . . . .	64
§ 4.4. Циклы ДВС со смешанным подводом теплоты. . . . .	67
<b>Глава 5. Циклы газотурбинных установок. . . . .</b>	<b>69</b>
§ 5.1. Циклы ГТУ с подводом теплоты при постоянном давлении. . . . .	69
§ 5.2. Циклы ГТУ с подводом теплоты при постоянном объеме. . . . .	72
§ 5.3. Методы повышения термического КПД ГТУ. . . . .	74
<b>Глава 6. Циклы паросиловых установок. . . . .</b>	<b>81</b>
§ 6.1. Цикл Карно во влажном паре и его недостатки. . . . .	81
§ 6.2. Основной цикл ПСУ — цикл Ренкина. . . . .	82
§ 6.3. Полезная работа цикла Ренкина. Работа питательного насоса. . . . .	83
§ 6.4. Термический КПД цикла Ренкина. . . . .	84
§ 6.5. Влияние параметров пара на термический КПД цикла Ренкина. . . . .	86
§ 6.6. Промежуточный перегрев пара. . . . .	87
§ 6.7. Регенеративный цикл паросиловой установки. . . . .	89
<b>Глава 7. Циклы холодильных машин. . . . .</b>	<b>94</b>
§ 7.1. Классификация холодильных машин. . . . .	94
§ 7.2. Цикл воздушной холодильной установки. . . . .	96
§ 7.3. Цикл паровой компрессорной холодильной установки. . . . .	98
§ 7.4. Цикл холодильной установки абсорбционного типа. . . . .	99
§ 7.5. Цикл пароэжекторной холодильной установки. . . . .	100
§ 7.6. Тепловой насос. . . . .	101
<b>ЧАСТЬ II</b>	
<b>Глава 8. Общие вопросы теории теплообмена. . . . .</b>	<b>103</b>
§ 8.1. Основы теории теплообмена. . . . .	103
§ 8.2. Температурное поле. . . . .	105
§ 8.3. Температурный градиент. . . . .	109
§ 8.4. Тепловой поток: векторная и скалярная формы закона Фурье. . . . .	111
§ 8.5. Дифференциальное уравнение теплопроводности. . . . .	115
<b>Глава 9. Математическая постановка краевых задач. . . . .</b>	<b>122</b>
§ 9.1. Условия однозначности. . . . .	122
§ 9.2. Краевые условия. . . . .	124
<b>Глава 10. Метод дополнительных граничных условий в нестационарных задачах теплопроводности. . . . .</b>	<b>129</b>
§ 10.1. Основные положения и обоснование метода. . . . .	129
§ 10.2. Неограниченная пластина (алгебраические координатные функции). . . . .	130
§ 10.3. Тригонометрические координатные функции. . . . .	139
§ 10.4. Неограниченная пластина (граничные условия третьего рода). . . . .	146
§ 10.5. Бесконечный цилиндр (граничные условия первого рода). . . . .	150
§ 10.6. Бесконечный цилиндр (граничные условия третьего рода). . . . .	157
§ 10.7. Шар (граничные условия первого рода). . . . .	162
§ 10.8. Шар (граничные условия третьего рода). . . . .	165
	421

§ 10.9. Задачи теплопроводности при несимметричных граничных условиях третьего рода. . . . .	169
§ 10.10. Метод дополнительных граничных условий в задачах теплопроводности для многослойных конструкций. . . . .	175
<b>Глава 11. Задачи теплопроводности на основе определения фронта температурного возмущения и дополнительных граничных условий. . . . .</b>	<b>180</b>
§ 11.1. Неограниченная пластина (граничные условия первого рода) . . .	180
§ 11.2. Цилиндр, шар (граничные условия первого рода). . . . .	207
§ 11.3. Пластина, цилиндр, шар (граничные условия третьего рода). . .	221
§ 11.4. Граничные условия второго рода. . . . .	238
§ 11.5. Задачи теплопроводности с внутренними источниками теплоты (граничные условия первого рода) . . . . .	248
§ 11.6. Внутренние источники теплоты при граничных условиях второго рода . . . . .	262
§ 11.7. Внутренние источники теплоты при граничных условиях третьего рода . . . . .	263
§ 11.8. Двумерные задачи теплопроводности с источником теплоты. . .	264
§ 11.9. Анализ решений уравнений теплопроводности при конечной и бесконечной скорости распространения теплоты. . . . .	269
§ 11.10. Приближенные аналитические решения нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений. . . . .	275
<b>Глава 12. Переменные граничные условия и источники теплоты . . . . .</b>	<b>283</b>
§ 12.1. Температура стенки — линейная функция времени . . . . .	283
§ 12.2. Граничные условия третьего рода с переменной во времени температурой среды. . . . .	290
§ 12.3. Граничные условия третьего рода с переменными во времени коэффициентами теплоотдачи . . . . .	296
§ 12.4. Переменные во времени граничные условия второго рода . . .	304
§ 12.5. Переменные во времени внутренние источники теплоты . . . .	309
§ 12.6. Переменное начальное условие. . . . .	312
§ 12.7. Несимметричные граничные условия . . . . .	324
<b>Глава 13. Нелинейные задачи теплопроводности . . . . .</b>	<b>330</b>
§ 13.1. Коэффициент температуропроводности — линейная функция температуры . . . . .	330
§ 13.2. Коэффициент температуропроводности — степенная функция температуры . . . . .	340
§ 13.3. Нелинейные задачи теплопроводности с внутренними источниками теплоты . . . . .	343
§ 13.4. Задачи теплопроводности с переменными физическими свойствами среды . . . . .	345
<b>Глава 14. Конвективный теплообмен в потоках жидкостей . . . . .</b>	<b>348</b>
§ 14.1. Общие сведения о пограничном слое. Гидродинамическая теория теплообмена . . . . .	348
§ 14.2. Динамический пограничный слой . . . . .	351
§ 14.3. Тепловой пограничный слой . . . . .	353

§ 14.4. Аналитические решения уравнений динамического пограничного слоя . . . . .	355
§ 14.5. Аналитические решения уравнений теплового пограничного слоя при граничных условиях первого рода на стенке . . . . .	368
§ 14.6. Аналитические решения уравнений теплового пограничного слоя при граничных условиях третьего рода на стенке . . . . .	379
§ 14.7. Теплообмен при течении жидкостей в плоскопараллельных каналах	384
<b>Г л а в а 15. Обобщенные функции в задачах теплопроводности для многослойных конструкций . . . . .</b>	<b>397</b>
§ 15.1. Стационарная теплопроводность в многослойной пластине . . .	397
§ 15.2. Стационарная теплопроводность в многослойном цилиндре. . .	404
§ 15.3. Многослойная пластина с постоянными внутренними источниками теплоты . . . . .	406
§ 15.4. Стационарная нелинейная теплопроводность в многослойной пластине. . . . .	413
<b>Литература . . . . .</b>	<b>419</b>