

# ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА



УЧЕБНИК

Министерство образования и науки  
Донецкой Народной Республики  
ГО ВПО «Донецкий национальный университет  
экономики и торговли  
имени Михаила Туган-Барановского»  
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет»

Приурочен  
100-летию ДонНТУ

Приурочен  
100-летию ДОННУЭТ

# **ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА**

## **УЧЕБНИК**

Донецк  
2021

УДК [536+533.6.011.6](075.8)

ББК 31.31я73+22.253.3я73

Т35

*Коллектив авторов:*

Карнаух В.В., канд. техн. наук, проф. – раздел 8, 10, 12, 13

Бирюков А.Б., докт. техн. наук, проф. – раздел 4, 5, 6

Ржесик К.А., канд. техн. наук, проф. – раздел 1, 2, 3

Лебедев А.Н., канд. техн. наук, доц. – раздел 7, 9, 11

*Рецензенты:*

Трубаев П. А. – докт. техн. наук, профессор;

Белоусов В.В. – докт. техн. наук, профессор;

Поперечный А.Н. – докт. техн. наук, профессор;

Угланов Д. А. – канд. техн. наук, доцент.

*Присвоен гриф «Рекомендовано Министерством образования и науки Донецкой Народной Республики» на основании решения Экспертного совета по присвоению учебным изданиям грифа от 28.12.2020г. (протокол №7)*

**Т 34** Техническая термодинамика [Текст] : учебник / М-во образования и науки Донец. Нар. Респ., Гос. орг. высш. проф. образования «Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского», Гос. образоват. учреждение высш. проф. образования «Донецкий национальный технический университет» ; коллектив авт.: Карнаух В.В., Бирюков А.Б., Ржесик К.А., Лебедев А.Н. – Донецк : ДОННУЭТ, 2021. – 480с.

ISBN 978-5-91556-928-6

В учебнике рассмотрены основные положения классической и современной термодинамики: идеальный газ и его прикладные аспекты; газовые смеси; теплоёмкость; анализ термодинамических процессов; законы термодинамики и их приложения; термодинамика реальных газов и потоков; влажный воздух и основы кондиционирования; анализ прямых и обратных термодинамических циклов; работоспособность термодинамической системы – эксергия. Кроме того, включены разделы, касающиеся анализа работы установок низкопотенциальной энергетики.

В ряде глав для лучшего понимания теоретического материала приведены примеры решения типовых задач по конкретной теме.

Учебник будет полезен студентам и аспирантам технических специальностей, инженерно-техническим работникам металлургической, энергетической, пищевой отраслей промышленности, также всем тем, кто имеет живой интерес к окружающему миру и протекающим термодинамическим процессам внутри него.

Публикуется в авторской редакции.

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ  
БИБЛИОТЕКА  
ДОННТУ**

1426311  
ISBN 978-5-91556-928-6

УДК [536+533.6.011.6](075.8)

ББК 31.31я73+22.253.3я73

© Коллектив авторов, 2021

© ГО ВПО «Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского, 2021

© ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет», 2021

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                                                   | Стр.      |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ .....</b>                                                                 | <b>6</b>  |
| <b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>                                                                              | <b>8</b>  |
| <b>ГЛАВА 1 Термодинамическая система: основные понятия и определения.....</b>                     | <b>11</b> |
| 1.1 Основные понятия .....                                                                        | 11        |
| 1.2 Параметры: молекулярная масса, масса и вес .....                                              | 15        |
| 1.3 Параметры: плотность и удельный объём.....                                                    | 17        |
| 1.4 Параметр: давление .....                                                                      | 19        |
| 1.5 Параметр: температура .....                                                                   | 22        |
| 1.6 Калорические параметры вещества .....                                                         | 27        |
| <b>ГЛАВА 2 Законы идеального газа. Теплоёмкость .....</b>                                         | <b>34</b> |
| 2.1 Законы идеального газа.....                                                                   | 34        |
| 2.2 Уравнение состояния идеального газа.....                                                      | 40        |
| 2.3 Теплоёмкость газов .....                                                                      | 44        |
| 2.4 Параметры процесса: работа и теплота .....                                                    | 55        |
| <b>ГЛАВА 3 Смеси идеальных газов .....</b>                                                        | <b>61</b> |
| 3.1 Закон Дальтона .....                                                                          | 61        |
| 3.2 Теплоёмкость газовой смеси .....                                                              | 67        |
| <b>ГЛАВА 4 Первый закон термодинамики.....</b>                                                    | <b>69</b> |
| 4.1 Тепловое равновесие: нулевой закон термодинамики .....                                        | 69        |
| 4.2 Первый закон термодинамики как форма закона сохранения и превращения энергии .....            | 70        |
| 4.3 Уравнение первого закона термодинамики для закрытых и открытых термодинамических систем ..... | 75        |
| <b>ГЛАВА 5 Основные термодинамические процессы идеальных газов .....</b>                          | <b>83</b> |
| 5.1 Алгоритм анализа термодинамических процессов .....                                            | 83        |
| 5.2 Изохорный процесс. Примеры применения.....                                                    | 84        |
| 5.3 Изобарный процесс. Примеры применения .....                                                   | 89        |
| 5.4 Изотермический процесс. Примеры применения.....                                               | 95        |
| 5.5 Адиабатный процесс. Примеры применения .....                                                  | 101       |
| 5.6 Политропный процесс. Примеры применения .....                                                 | 110       |



|                                                                                                    |            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>ГЛАВА 6 Второй закон термодинамики.....</b>                                                     | <b>117</b> |
| 6.1 Обратимые и необратимые процессы и циклы .....                                                 | 117        |
| 6.2 Формулировки второго закона термодинамики.....                                                 | 121        |
| 6.3 Энтропия. Принципы существования и возрастания<br>энтропии .....                               | 125        |
| 6.4 Объединённое уравнение первого и второго законов<br>термодинамики.....                         | 129        |
| 6.5 Цикл Карно. Термический коэффициент полезного<br>действия цикла Карно .....                    | 131        |
| <b>ГЛАВА 7 Дифференциальные уравнения термодинамики</b>                                            | <b>137</b> |
| 7.1 Уравнение Максвелла.....                                                                       | 137        |
| 7.2 Дифференциальные уравнения для внутренней энергии,<br>энтальпии и энтропии.....                | 139        |
| 7.3 Дифференциальное уравнение теплоёмкости .....                                                  | 143        |
| <b>ГЛАВА 8 Термодинамика реальных газов .....</b>                                                  | <b>147</b> |
| 8.1 Реальные газы: уравнение состояния .....                                                       | 147        |
| 8.2 Реальные газы: фазовые превращения, фазовые<br>диаграммы и таблицы.....                        | 155        |
| 8.3 Термодинамические процессы водяного пара .....                                                 | 170        |
| 8.4 Устройства для получения пара и горячей воды .....                                             | 174        |
| <b>ГЛАВА 9 Истечение газов и паров .....</b>                                                       | <b>183</b> |
| 9.1 Уравнение первого закона термодинамики для потока.....                                         | 183        |
| 9.2 Основные уравнения процессов течения .....                                                     | 187        |
| 9.3 Скорость звука .....                                                                           | 193        |
| 9.4 Истечение из суживающихся сопел .....                                                          | 201        |
| 9.5 Переход через скорость звука. Сопло Лавала .....                                               | 210        |
| 9.6 Истечение газов и паров с учётом трения.....                                                   | 215        |
| 9.7 Температура адиабатного торможения .....                                                       | 217        |
| <b>ГЛАВА 10 Влажный воздух и основы<br/>кондиционирования .....</b>                                | <b>219</b> |
| 10.1 Влажный воздух .....                                                                          | 219        |
| 10.2 Психрометрические диаграммы .....                                                             | 229        |
| 10.3 Процессы кондиционирования воздуха .....                                                      | 234        |
| 10.4 Гигиенические основы кондиционирования.<br>Классификация систем кондиционирования воздуха.... | 250        |

|                                                                                        |            |
|----------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>ГЛАВА 11 Прямые термодинамические циклы</b>                                         |            |
| <b>тепловых машин.....</b>                                                             | <b>256</b> |
| 11.1 Общие сведения о двигателе внутреннего сгорания .....                             | 257        |
| 11.2 Термодинамический анализ циклов поршневых<br>двигателей внутреннего сгорания..... | 261        |
| 11.3 Циклы газотурбинных установок.....                                                | 271        |
| 11.4 Теплосиловые паровые циклы.....                                                   | 282        |
| 11.5 Органический цикл Ренкина.....                                                    | 303        |
| <b>ГЛАВА 12 Обратные термодинамические циклы .....</b>                                 | <b>308</b> |
| 12.1 Обратный цикл Карно .....                                                         | 308        |
| 12.2 Основные элементы холодильной машины (теплого<br>насоса) .....                    | 312        |
| 12.3 Цикл и термодинамический анализ газовой<br>холодильной машины.....                | 319        |
| 12.4 Цикл и термодинамический анализ<br>парокомпрессионной холодильной машины .....    | 322        |
| 12.5 Фазовые диаграммы холодильных агентов .....                                       | 327        |
| 12.6 Цикл и термодинамический анализ парожетторной<br>холодильной машины.....          | 334        |
| 12.7 Цикл и термодинамический анализ абсорбционной<br>холодильной машины.....          | 339        |
| 12.8 Тепловые насосы .....                                                             | 343        |
| 12.9 Теорема Нернста. Третий закон термодинамики.....                                  | 349        |
| <b>ГЛАВА 13 Работоспособность термодинамической<br/>    системы. Эксергия .....</b>    | <b>353</b> |
| 13.1 Эксергия, её виды и составляющие .....                                            | 353        |
| 13.2 Анергия.....                                                                      | 370        |
| 13.3 Уравнение эксергетического баланса. Эксергетический<br>КПД.....                   | 376        |
| 13.4 Эксергетические диаграммы .....                                                   | 380        |
| 13.5 Примеры эксергетического анализа работы тепловых и<br>холодильных установок ..... | 389        |
| <b>БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....</b>                                                  | <b>401</b> |
| <b>ГЛОССАРИЙ .....</b>                                                                 | <b>405</b> |
| <b>ПРИЛОЖЕНИЯ.....</b>                                                                 | <b>415</b> |