

БАКАЛАВР. АКАДЕМИЧЕСКИЙ КУРС

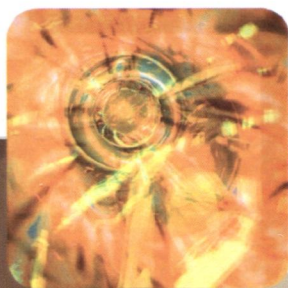
Г. В. Белов

# ТЕРМОДИНАМИКА

Часть 1

УЧЕБНИК и ПРАКТИКУМ

3-е издание



**УМО ВО**  
РЕКОМЕНДУЕТ

**Юрайт**  
издательство  
biblio-online.ru

**Г. В. Белов**

# **ТЕРМОДИНАМИКА**

## **Часть 1**

**УЧЕБНИК И ПРАКТИКУМ  
ДЛЯ АКАДЕМИЧЕСКОГО БАКАЛАВРИАТА**

**3-е издание, исправленное и дополненное**

*Рекомендовано Учебно-методическим отделом высшего образования в качестве учебника и практикума для студентов высших учебных заведений, обучающихся по естественнонаучным и инженерно-техническим направлениям*

**Книга доступна в электронной библиотечной системе  
[biblio-online.ru](http://biblio-online.ru)**

**Москва • Юрайт • 2017**

УДК 536(075.8)

ББК 22.3я73

Б43

**Автор:**

**Белов Глеб Витальевич** — доктор технических наук, ведущий научный сотрудник кафедры физической химии химического факультета Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, профессор Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана, старший научный сотрудник Объединенного института высоких температур Российской академии наук.

**Рецензенты:**

*Хвостюк В. И.* — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теплофизики Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана;

*Еремин В. В.* — доктор физико-математических наук, профессор химического факультета Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова.

**Белов, Г. В.**

Б43 Термодинамика. В 2 ч. Часть 1 : учебник и практикум для академического бакалавриата / Г. В. Белов. — 3-е изд., испр. и доп. — М. : Издательство Юрайт, 2017. — 264 с. — (Серия : Бакалавр. Академический курс).

ISBN 978-5-534-05093-6 (ч. 1)

ISBN 978-5-534-05095-0

В данном учебнике нашли отражение практически все вопросы, которые содержатся в традиционных учебниках по термодинамике. Его особенностью является то, что при изложении основных законов термодинамики используются такие понятия, как мощность, поток массы, поток теплоты, что должно облегчить понимание студентами роли и места термодинамики в системе естественнонаучных предметов и научить их применять законы термодинамики для решения практических задач. При изложении материала смысл теоретических положений во многих местах раскрывается путем разбора задач. Для закрепления полученных знаний в конце каждой главы приводится большое количество качественных вопросов и задач разной сложности.

Соответствует актуальным требованиям Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования.

*Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по естественнонаучным и инженерно-техническим направлениям.*

УДК 536(075.8)

ББК 22.3я73



*Все права защищены. Никакая часть данной книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме без письменного разрешения владельцев авторских прав. Правовую поддержку издательства обеспечивает юридическая компания «Дельфи».*

ISBN 978-5-534-05093-6 (ч. 1)

ISBN 978-5-534-05095-0

© Белов Г. В., 2015

© Белов Г. В., 2017, с изменениями

© ООО «Издательство Юрайт», 2017

# Оглавление

|                                                                  |           |
|------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Предисловие .....</b>                                         | <b>8</b>  |
| <b>Глава 1. Основные понятия термодинамики.....</b>              | <b>10</b> |
| 1.1. Введение.....                                               | 10        |
| 1.2. Термодинамическая система .....                             | 14        |
| 1.3. Термодинамические свойства системы .....                    | 16        |
| 1.4. Термодинамическое равновесие.....                           | 23        |
| 1.5. Термодинамический процесс .....                             | 28        |
| 1.6. Нулевой закон термодинамики и эмпирическая температура..... | 29        |
| 1.7. Термическое уравнение состояния.....                        | 33        |
| 1.8. О термодинамическом моделировании .....                     | 40        |
| Резюме.....                                                      | 42        |
| <i>Список рекомендуемой литературы</i> .....                     | 42        |
| <i>Вопросы для самопроверки</i> .....                            | 42        |
| <i>Задачи для самостоятельного решения</i> .....                 | 43        |
| <b>Глава 2. Энергия, работа, теплота .....</b>                   | <b>46</b> |
| 2.1. Энергия и ее формы.....                                     | 47        |
| 2.2. Энергия системы.....                                        | 48        |
| 2.3. Работа.....                                                 | 53        |
| 2.4. Элементы теории теплообмена.....                            | 66        |
| 2.5. Перенос энергии посредством массообмена .....               | 73        |
| Резюме.....                                                      | 75        |
| <i>Вопросы и задания для самопроверки</i> .....                  | 75        |
| <i>Задачи для самостоятельного решения</i> .....                 | 76        |
| <b>Глава 3. Первый закон термодинамики.....</b>                  | <b>78</b> |
| 3.1. Общая структура балансового уравнения .....                 | 78        |
| 3.2. Формулировка первого закона термодинамики.....              | 81        |
| 3.3. Баланс массы для открытой системы .....                     | 88        |
| 3.4. Первый закон термодинамики для открытых систем.....         | 90        |
| 3.5. Понятие о теплоемкости .....                                | 96        |
| 3.6. Применение первого закона термодинамики .....               | 101       |
| 3.7. Теплообменники .....                                        | 104       |
| 3.8. Калорические уравнения состояния.....                       | 105       |
| Резюме.....                                                      | 107       |
| <i>Список рекомендуемой литературы</i> .....                     | 108       |
| <i>Вопросы и задания для самопроверки</i> .....                  | 108       |
| <i>Задачи для самостоятельного решения</i> .....                 | 109       |

|                                                                             |            |
|-----------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Глава 4. Основные термодинамические процессы .....</b>                   | <b>112</b> |
| 4.1. Процессы с участием идеального газа .....                              | 112        |
| 4.2. Сжатие и расширение идеального газа .....                              | 119        |
| 4.3. Понятие об одномерном потоке.....                                      | 122        |
| Резюме.....                                                                 | 129        |
| <i>Вопросы и задания для самопроверки</i> .....                             | 130        |
| <i>Задачи для самостоятельного решения</i> .....                            | 130        |
| <b>Глава 5. Второй закон термодинамики .....</b>                            | <b>133</b> |
| 5.1. Принцип необратимости .....                                            | 134        |
| 5.2. Энтропия и абсолютная температура.....                                 | 138        |
| 5.3. Энтропия и термодинамическая вероятность .....                         | 143        |
| 5.4. Фундаментальное уравнение Гиббса для простых систем .....              | 150        |
| 5.5. Процессы релаксации и термодинамическое равновесие .....               | 157        |
| 5.6. Общая формулировка второго закона термодинамики .....                  | 160        |
| 5.7. Второй закон термодинамики для закрытых систем .....                   | 162        |
| 5.8. Связь энтропии и теплоты.....                                          | 164        |
| 5.9. Второй закон термодинамики для открытых систем.....                    | 167        |
| 5.10. Использование второго закона термодинамики .....                      | 172        |
| Резюме.....                                                                 | 182        |
| <i>Список рекомендуемой литературы</i> .....                                | 182        |
| <i>Вопросы и задания для самопроверки</i> .....                             | 182        |
| <i>Задачи для самостоятельного решения</i> .....                            | 183        |
| <b>Глава 6. Термодинамические циклы .....</b>                               | <b>186</b> |
| 6.1. Циклы тепловых машин .....                                             | 186        |
| 6.2. Энергетический анализ циклов .....                                     | 188        |
| 6.3. Цикл Карно. Теорема Карно.....                                         | 192        |
| 6.4. Цикл Карно в координатах $T-s$ .....                                   | 198        |
| 6.5. Баланс энтропии и циклические процессы .....                           | 201        |
| 6.6. О максимальных коэффициентах полезного действия.....                   | 203        |
| 6.7. Изозэнтропная эффективность турбин, сопел, компрессоров и насосов .... | 205        |
| Резюме.....                                                                 | 208        |
| <i>Вопросы для самопроверки</i> .....                                       | 208        |
| <i>Задачи для самостоятельного решения</i> .....                            | 209        |
| <b>Глава 7. Процессы течения газов .....</b>                                | <b>212</b> |
| 7.1. Параметры адиабатного торможения .....                                 | 212        |
| 7.2. Скорость звука.....                                                    | 213        |
| 7.3. Истечение из суживающихся сопел .....                                  | 216        |
| 7.4. Переход через скорость звука. Сопло Лаваля .....                       | 224        |
| 7.5. О профилировании конического сопла .....                               | 228        |
| Резюме.....                                                                 | 229        |
| <i>Вопросы для самопроверки</i> .....                                       | 230        |
| <i>Задачи для самостоятельного решения</i> .....                            | 230        |
| <b>Глава 8. Эксергия и превращения энергии .....</b>                        | <b>233</b> |
| 8.1. Влияние окружающей среды на преобразование энергии .....               | 233        |
| 8.2. Эксергия закрытой системы .....                                        | 235        |

|                                                                    |     |
|--------------------------------------------------------------------|-----|
| 8.3. Эксергия потока вещества .....                                | 238 |
| 8.4. Эксергия теплоты. Эксергия смешения двух идеальных газов..... | 239 |
| 8.5. Потери эксергии и эксергетический баланс .....                | 241 |
| 8.6. Эксергетическая эффективность .....                           | 243 |
| Резюме.....                                                        | 247 |
| <i>Вопросы для самопроверки</i> .....                              | 247 |
| <i>Задачи для самостоятельного решения</i> .....                   | 248 |

|                                                                                                      |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Глава 9. Общие соотношения между калорическими<br/>и термическими параметрами состояния .....</b> | <b>250</b> |
| 9.1. Соотношения Максвелла.....                                                                      | 250        |
| 9.2. Уравнение состояния и термодинамические свойства .....                                          | 251        |
| 9.3. Внутренняя энергия и энтальпия как функции термических<br>параметров .....                      | 253        |
| 9.4. Энтропия как функция термических параметров.....                                                | 257        |
| 9.5. Теплоемкости как функции термических параметров состояния.....                                  | 259        |
| 9.6. Скорость звука и показатель адиабаты .....                                                      | 263        |
| Резюме.....                                                                                          | 264        |
| <i>Вопросы для самопроверки</i> .....                                                                | 265        |
| <i>Задачи для самостоятельного решения</i> .....                                                     | 265        |