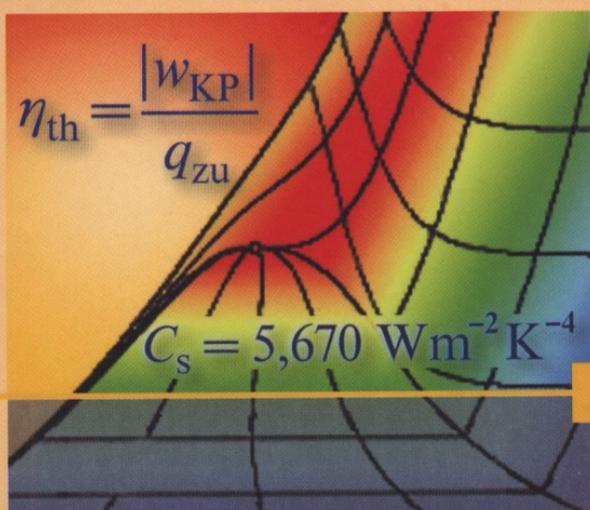


Ганс-Иоахим Кретцшмар
Инго Крафт

Техническая термодинамика

Краткий сборник формул



FOLIANT

ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА

КРАТКИЙ СБОРНИК ФОРМУЛ

Проф., доктор техн. наук Ганс-Иоахим Кретцшмар
Проф., доктор техн. наук Инго Крафт
в сотрудничестве с доктором техн. наук Инес Штёкер

ИЗДАТЕЛЬСТВО
FOLIANT

Астана-2013

УДК 536 (075.8)
ББК 22.317 я 73
К 80

Библиографическая информация Национальной библиотеки
Германии

Настоящее издание внесено в реестр Национальной библиотеки Германии;
более подробные библиографические данные см. на сайте в Интернете
<http://dnb.d-nb.de>.

Кретцшмар Ганс-Иоахим, Крафт Инго
К 80 **Техническая термодинамика. Краткий сборник формул I**
Пер. с немецкого. – Астана: Фолиант, 2013. – 240 с.

ISBN 978-601-302-031-0

Настоящая публикация защищена авторским правом.

Все права, в том числе связанные с переводом, последующей печатью и тиражированием книги, либо ее частей, принадлежат издательству. Ни одна часть книги не подлежит переработке, репродуцированию, в том числе с применением электронных систем, тиражированию или распространению в какой-либо форме (фотокопии, микрофильм или иным способом) без письменного согласия издательства.

Сборник составлен в соответствии с программой курса «Техническая термодинамика» и предназначен для студентов и преподавателей технических вузов и факультетов. Перевод на русский язык произведен с 4-го, обновленного немецкого издания.

Издание книги на русском языке осуществлено по соглашению с компанией Hanser Verlag (ФРГ, Мюнхен).

УДК 536 (075.8)
ББК 22.317 я 73

© 2011, Издательство Hanser Verlag, Мюнхен,
4-е, обновленное издание

© 2013, Издательство «Фолиант», Астана

ISBN 978-601-302-031-0 © Агентство «ИНТЕРА ГРУПП», пер. с нем., 2013

Предисловие к четвертому (немецкому) изданию

Краткий сборник формул по технической термодинамике прошел практическую апробацию. Настоящее четвертое издание включает в себя наиболее важные формулы и вычислительные алгоритмы по технической термодинамике, в том числе по теплопередаче для следующих специальностей:

- машиностроение
- энергетика, технологии производственных процессов, природоохранные технологии на производстве
- техническое оборудование зданий, энергетические сети и системы
- технологии тепловых и охлаждающих насосов
- экономическая инженерия,

обучение по которым ведется в университетах, высших специальных учебных заведениях, профессиональных академиях и средних специальных учебных заведениях.

В сборнике представлены следующие области технической термодинамики:

- энергетика и термодинамические свойства материалов,
- простые и круговые процессы,
- теплопередача и
- термодинамика влажного воздуха.

Кроме того, настоящий сборник может служить в качестве основы для расчета машин, аппаратов и устройств.

Концепция учения об энергетике ориентируется на понятия, выдвинутом заслуженным профессором, доктором технических наук В. Вагнером, сотрудником кафедры термодинамики Рурского университета г. Бохум.

Помимо этого, в сборнике сохраняется практически ориентированное представление теории. С целью обеспечения непосредственного использования формул под каждой из них дано пояснение всех ее составляющих. Подробный перечень диаграмм и характеристик материалов, данный в приложении, позволяет применять балансовые и вычислительные уравнения.

Главу «Смеси идеальных газов», а также прочие разделы и перечни характеристик материалов, в том числе программное обеспечение для программ Excel®, Mathcad® и различных карманных ВМ можно скачать, пройдя по ссылке на сайт в Интернете: www.thermodynamik-formelsammlung.de.

Авторы выражают свою благодарность доктору технических наук И. Штёкер за разработку рисунков, диаграмм и таблиц, а также доктору технических наук (FH) М. Кунику за вычисление характеристик материалов в приложении.

Ганс-Иоахим Кретцимар и Инго Крафт

Оглавление

1 Термодинамические величины	9
1.1 Типы величин	9
1.2 Величины и единицы	10
1.3 Пересчет единиц	12
2 Характеристики состояния чистых веществ	13
2.1 Однофазные области и фазовый переход	13
2.2 Двухфазная область: жидкое – газообразное.....	14
2.3 Области вычисления состояния.....	17
2.3.1 Области вычисления состояния по p, T -диаграмме.....	18
2.3.2 Области вычисления состояния по p, v -диаграмме	19
2.3.3 Области вычисления состояния по T, s -диаграмме	20
2.3.4 Области вычисления состояния по h, s -диаграмме	21
3 Термические параметры состояния	22
3.1 Температура.....	22
3.2 Давление	23
3.3 Плотность и удельный объем.....	24
3.3.1 Определения	24
3.3.2 Получение v и ρ для реальной жидкости.....	25
3.3.3 Получение v и ρ для идеальных газов.....	25
3.3.4 Получение v и ρ для несжимаемых (идеальных) жидкостей и твердых тел	28
3.3.5 Получение v и ρ для влажного пара	28
3.4 Нормальные физические условия	31
4 Энергетические параметры состояния	32
4.1 Теплоемкость.....	32
4.1.1 Определения	32
4.1.2 Получение c_p и c_v для реальной жидкости	32
4.1.3 Получение c_p и c_v для идеальных газов.....	33
4.1.4 Получение c_p и c_v для несжимаемых (идеальных) жидкостей и твердых тел	34
4.1.5 c_p и c_v для влажного пара.....	35
4.2 Показатель адиабаты и адиабатная скорость звука.....	35
4.2.1 Определения	35
4.2.2 Получение κ и w для реальной жидкости	36

4.2.3	Получение κ и w для идеальных газов	36
4.2.4	κ и w для несжимаемых (идеальных) жидкостей	37
4.2.5	κ и w для влажного пара	37
4.3	Энтальпия и внутренняя энергия	38
4.3.1	Определения	38
4.3.2	Получение h и u для реальной жидкости.....	40
4.3.3	Получение h и u для идеальных газов	40
4.3.4	Получение h и u для несжимаемых (идеальных) жидкостей и твердых тел	45
4.3.5	Получение h и u для влажного пара	49
4.4	Энтропия	51
4.4.1	Определение	51
4.4.2	Получение s для реальной жидкости	52
4.4.3	Получение s для идеальных газов	53
4.4.4	Получение удельной энтропии s для несжимаемых (идеальных) жидкостей	56
4.4.5	Получение s для влажного пара.....	56
4.5	Эксергия	57
4.5.1	Эксергия (энтальпия).....	57
4.5.2	Эксергия внутренней энергии	58
5	Материальный баланс	60
5.1	Масса, количество веществ и объем	60
5.2	Массовый и объемный расход потока	61
5.3	Материальный баланс при закрытых системах	61
5.4	Материальный баланс при открытых стационарных системах.....	62
5.5	Материальный баланс при открытых нестационарных системах	64
6	Энергетический баланс – первый закон термодинамики.....	65
6.1	Неподвижная закрытая система	65
6.1.1	Энергетический баланс между состояниями 1 и 2	65
6.1.2	Работа изменения объема	66
6.1.3	Полезная внешняя и индикаторная работа	68
6.1.4	Диссипативные работы.....	69
6.1.5	Теплота.....	71
6.1.6	Нестационарный энергетический баланс	73
6.2	Неподвижная открытая система	74
6.2.1	Стационарный энергетический баланс	77

6.2.2	Техническая работа.....	77
6.2.3	Общий нестационарный энергетический баланс	79
6.3	Расчет разности удельной энтальпии и удельной внутренней энергии.....	80
6.3.1	Реальная жидкость	80
6.3.2	Идеальные газы.....	80
6.3.3	Несжимаемые (идеальные) жидкости.....	84
6.3.4	Влажный пар	88
7	Баланс энтропии – второй закон термодинамики	89
7.1	Неподвижная изолированная система	89
7.1.1	Баланс энтропии между состояниями 1 и 2.....	89
7.1.2	Энтропия теплоты	90
7.1.3	Производство энтропии.....	91
7.1.4	Энергия диссипации	93
7.2	Неподвижная открытая система	94
7.3	Расчет разностей удельной энтропии.....	96
7.3.1	Реальная жидкость	96
7.3.2	Идеальные газы	96
7.3.3	Несжимаемые (идеальные) жидкости.....	99
7.3.4	Влажный пар	101
8	Эксергетический баланс.....	102
8.1	Неподвижная изолированная система	102
8.1.1	Эксергетический баланс между состояниями 1 и 2.....	102
8.1.2	Эксергия теплоты.....	103
8.1.3	Потеря эксергии	104
8.2	Неподвижная открытая система	105
8.3	Вычисление разностей удельной эксергии.....	108
9	Термодинамические изопроцессы	109
9.1	Основы термодинамического моделирования технических процессов	109
9.2	Сферы применения в технике.....	115
9.2.1	Жидкость в емкостях с неэластичными стенками	115
9.2.2	Жидкость под постоянным давлением.....	116
9.2.3	Смесь потоков жидкости	118
9.2.4	Уплотнение и нагнетание насосом	119
9.2.5	Сброс давления в турбинах.....	123
9.2.6	Расширение при дросселировании.....	126

10 Круговые процессы	128
10.1 Основы	128
10.2 Цикл газотурбинных установок – цикл Джоуля	134
10.3 Цикл паротурбинных установок – цикл Клаузиуса-Ренкина	137
10.4 Цикл холодильных установок и тепловых насосов	141
11 Теплопередача.....	144
11.1 Свойства теплопроводности материалов	144
11.2 Стационарная теплопроводность	145
11.2.1 Основы	145
11.2.2 Плоская стенка	148
11.2.3 Цилиндрическая стенка (трубчатая стенка).....	149
11.2.4 Сферическая стенка	151
11.3 Конвективный теплообмен.....	152
11.3.1 Температурное поле	153
11.3.2 Тепловой поток и коэффициент теплоотдачи	154
11.3.3 Критерии (числа) подобия.....	156
11.3.4 Свободная (естественная) конвекция	158
11.3.5 Вынужденная конвекция	163
11.4 Тепловое излучение	168
11.4.1 Энергетический баланс	168
11.4.2 Радиационный теплообмен между двумя поверхностями.....	170
11.4.3 Коэффициент радиационного теплообмена (результатирующий коэффициент теплообмена) для частных случаев	173
11.5 Теплопередача	175
12 Термодинамика влажного воздуха.....	180
12.1 Постоянные для вычислений	180
12.2 Виды влажного воздуха	182
12.3 Состав влажного воздуха	184
12.3.1 Общий состав влажного воздуха – содержание воды.....	184
12.3.2 Ненасыщенный влажный воздух – относительная влажность.....	187
12.3.3 Насыщенный влажный воздух.....	190
12.3.4 Пересыщенный влажный воздух (туман)	192
12.4 Плотность и удельный объем воздуха	192
12.5 Удельная теплоемкость.....	195

12.6 Показатель адиабаты и адиабатная скорость звука.....	196
12.7 Удельная энтальпия воздуха и внутренняя энергия	197
12.8 Температура точки росы.....	200
12.9 Температура по влажному термометру (предельная температура охлаждения)	201
12.10 h_{1+x}, x_w -диаграмма.....	203
12.11 Балансирование процессов с влажным воздухом	204
12.12 Применение расчетов состояния влажного воздуха к влажным газам.....	208
Список использованной литературы	209

ПРИЛОЖЕНИЕ

A Перечень характеристик материалов	211
A1 Постоянные, независимые от материалов	211
A2 Постоянные, зависимые от материалов (1).....	211
A2 Постоянные, зависимые от материалов (2).....	212
A3 Характеристики газов в идеальном состоянии (1).....	213
A3 Характеристики газов в идеальном состоянии (2).....	214
A3 Характеристики газов в идеальном состоянии (3).....	215
A3 Характеристики газов в идеальном состоянии (4).....	216
A3 Характеристики газов в идеальном состоянии (5).....	217
A4 Характеристики воды и водяного пара на линии насыщения	218
A5 Параметры воды (реальная жидкость).....	219
A6 Параметры воды в жидком состоянии (идеальная жидкость)	220
A7 Параметры воздуха (реальная жидкость)	221
A8 Параметры воздуха при $p = 0,101325$ МПа.....	222
A9 Теплотехнические характеристики твердых веществ (средние значения)	223
A10 Степень черноты материалов (средние значения)	224
A11 Низшая и высшая теплота сгорания	225
A12 Парциальное давление насыщения воды.....	226
Предметный указатель	227
V Диаграмма состояния (в качестве приложения)	
V1 h,s -диаграмма Молье	
V2 T,s -диаграмма воды и водяного пара	
V3 $\lg p,h$ -диаграмма аммиака	
V4 h_{1+x}, x_w -диаграмма влажного воздуха	