

W prostocie tkwi siła

Termodynamika

DLA

BYSTRZAKÓW™

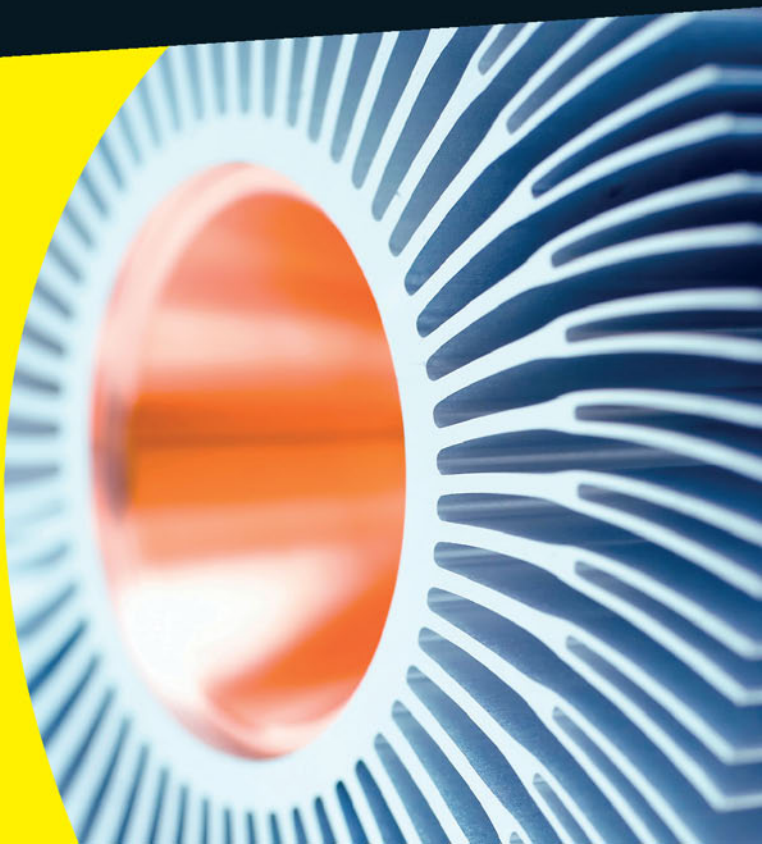
Dowiedz się, jak:

- zrozumieć koncepcje i zasady termodynamiki
- nabyć umiejętności rozwiązywania problemów wykorzystywane przez profesjonalistów
- zabłysnąć na zajęciach z termodynamiki



Dr Michael Pauken

główny inżynier mechanik w Laboratorium Napędu
Odrzutowego NASA Kalifornijskiego Instytutu Technologicznego



Tytuł oryginału: Thermodynamics For Dummies

Tłumaczenie: Leszek Sielicki

ISBN: 978-83-283-2753-5

Original English language edition Copyright © 2011 by Wiley Publishing, Inc., Indianapolis, Indiana

All rights reserved including the right of reproduction in whole or in part any form.

This translation published by arrangement with John Wiley & Sons, Inc.

Oryginalne angielskie wydanie © 2011 by Wiley Publishing, Inc., Indianapolis, Indiana

Wszelkie prawa, włączając prawo do reprodukcji całości lub części w jakiegokolwiek formie, zarezerwowane.

Tłumaczenie opublikowane na mocy porozumienia z John Wiley & Sons, Inc.

Translation copyright © 2017 by Helion SA

Wiley, the Wiley Publishing logo, For Dummies, Dla Bystrzaków, the Dummies Man logo, A Reference for the Rest of Us!, The Dummies Way, Dummies Daily, The Fun and Easy Way, Dummies.com, and related trade dress are trademarks or registered trademarks of John Wiley and Sons, Inc. and/or its affiliates in the United States and/or other countries. Used by permission.

Wiley, the Wiley Publishing logo, For Dummies, Dla Bystrzaków, the Dummies Man logo, A Reference for the Rest of Us!, The Dummies Way, Dummies Daily, The Fun and Easy Way, Dummies.com i związana z tym szata graficzna są markami handlowymi John Wiley and Sons, Inc. i/lub firm stowarzyszonych w Stanach Zjednoczonych i/lub innych krajach. Wykorzystywane na podstawie licencji.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage retrieval system, without permission from the Publisher.

Wszelkie prawa zastrzeżone. Nieautoryzowane rozpowszechnianie całości lub fragmentu niniejszej publikacji w jakiegokolwiek postaci jest zabronione. Wykonywanie kopii metodą kserograficzną, fotograficzną, a także kopiowanie książki na nośniku filmowym, magnetycznym lub innym powoduje naruszenie praw autorskich niniejszej publikacji.

Autor oraz Wydawnictwo HELION dołożyli wszelkich starań, by zawarte w tej książce informacje były kompletne i rzetelne. Nie biorą jednak żadnej odpowiedzialności ani za ich wykorzystanie, ani za związane z tym ewentualne naruszenie praw patentowych lub autorskich. Autor oraz Wydawnictwo HELION nie ponoszą również żadnej odpowiedzialności za ewentualne szkody wynikłe z wykorzystania informacji zawartych w książce.

Drogi Czytelniku!

Jeżeli chcesz ocenić tę książkę, zajrzyj pod adres

<http://dlabystrzakow.pl/user/opinie/terms>

Możesz tam wpisać swoje uwagi, spostrzeżenia, recenzję.

Wydawnictwo HELION

ul. Kościuszki 1c, 44-100 Gliwice

tel. 32 231 22 19, 32 230 98 63

e-mail: dlabystrzakow@dlabystrzakow.pl

WWW: <http://dlabystrzakow.pl>

Printed in Poland.

- Kup książkę
- Poleć książkę
- Oceń książkę

- Księgarnia internetowa
- Lubię to! » Nasza społeczność

Spis treści

.....

O autorze	13
------------------------	-----------

Podziękowania od autora	15
--------------------------------------	-----------

Wstęp	17
--------------------	-----------

O książce	17
Konwencje zastosowane w książce	18
Czego nie czytać	18
Naiwne założenia	19
Jak podzielona jest książka	19
Część I: Podstawy termodynamiki	19
Część II: Stosowanie zasad termodynamiki	19
Część III: Samoloty, pociągi i samochody — niech ciepło dla nas pracuje	20
Część IV: Relacje, reakcje i mieszaniny termodynamiczne	20
Część V: Dekalogi	21
Ikony użyte w książce	21
Co dalej	21

<i>Część I: Podstawy termodynamiki</i>	23
---	-----------

Rozdział 1: Termodynamika w codziennym życiu	25
---	-----------

Jak rozumieć termodynamikę	26
Badanie form energii	26
Energia kinetyczna	27
Energia potencjalna	27
Energia wewnętrzna	28
Energia i praca w akcji	28
Silniki — umożliwianie energii wykonywania pracy	28
Chłodzenie — umożliwienie pracy odprowadzania ciepła	29
Gazy rzeczywiste, mieszaniny gazów i reakcje spalania	29
Wielkie nazwiska i nowe sposoby oszczędzania energii	30

Rozdział 2: Fundamenty termodynamiki 31

Definiowanie najważniejszych parametrów stanu	32
Ogólne podstawy pomiarów	32
Masa	33
Ciśnienie	33
Temperatura	34
Gęstość	36
Energia	37
Entalpia	41
Ciepło właściwe	41
Entropia	42
Procesy termodynamiczne	43
Tworzenie ścieżki procesu	44
Ustalanie stanu na każdym z końców ścieżki — postulat stanu	45
Łączenie procesów w celu stworzenia cyklu	46
Prawa natury dotyczące temperatury, energii i entropii	47
Zasada zerowa dotycząca temperatury	47
Pierwsza zasada dotycząca zachowania energii	48
Druga zasada dotycząca entropii	49
Trzecia zasada dotycząca zera bezwzględnego	50

Rozdział 3: Praca z fazami i parametrami substancji 51

To tylko faza — opis ciał stałych, cieczy i gazów	51
Wykres fazowy	53
Wykres T-V	53
Wykres p-V	55
Przebieg przemian fazowych	56
Od cieczy sprężonej do cieczy nasyconej	57
Od nasyconej cieczy do nasyconej pary	58
Od pary nasyconej do pary przegrzanej	60
Znajdowanie parametrów termodynamicznych za pomocą tablic	61
Interpolacja liniowa	61
Interpolacja z wykorzystaniem dwóch zmiennych	62
Grzeczne gazy zachowują się doskonale	64

Rozdział 4: Praca i ciepło pasują do siebie jak dwie połówki jabłka 67

Praca może dokonać wielkich rzeczy	68
Praca ze sprężynami	69
Obracanie wału	70
Przyspieszanie samochodu	71
Ruch tłoków	72
Określanie pracy objętościowej	75
Ogrzewanie i chłodzenie	76
Podgrzewanie w kotłach	77
Chłodzenie za pomocą skraplaczy	79
Schładzanie z wykorzystaniem parowników	80

Część II: Stosowanie zasad termodynamiki 83

Rozdział 5: Stosowanie pierwszej zasady w układach zamkniętych 85

Zachowanie masy w układzie zamkniętym	85
Bilansowanie energii w układzie zamkniętym	86
Zastosowanie pierwszej zasady termodynamiki do przemian gazu doskonałego	88
Praca z układami o stałej objętości	89
Praca z procesami o stałym ciśnieniu	90
Praca z procesami o stałej temperaturze	92
Praca z procesami adiabatycznymi	94
Zastosowanie pierwszej zasady termodynamiki do przemian cieczy i ciał stałych	96

Rozdział 6: Zastosowanie pierwszej zasady w układach otwartych 99

Zachowanie masy w układzie otwartym	99
Masowe i objętościowe natężenie przepływu	100
Stosowanie zasady zachowania masy w układzie	100
Bilansowanie masy i energii w układzie	102
Gdy czas nie biegnie — proces w stanie ustalonym	103
Stosowanie pierwszej zasady w odniesieniu	
do czterech typowych procesów przebiegających w układach otwartych	105
Przepływ przez dysze i dyfuzory	105
Praca z pompami, sprężarkami i turbinami	107
Przepływ energii w wymiennikach ciepła	109
Zmniejszanie ciśnienia za pomocą zaworów dławiących	111
Gdy liczy się czas — procesy przejściowe	113
Założenia bilansu energetycznego	114
Analiza procesu niestacjonarnego	115

Rozdział 7: Analiza silników cieplnych i chłodziarek

z wykorzystaniem drugiej zasady termodynamiki 117

Konsekwencje drugiej zasady termodynamiki	118
Definiowanie zbiorników energii cieplnej	119
Parametry buforu ciepła	119
Uwzględnianie różnicy poziomów jakości	120
Druga zasada termodynamiki — sformułowanie Kelvina-Plancka dotyczące silników cieplnych	121
Charakterystyki silników cieplnych	121
Określanie sprawności cieplnej	123
Chłodzenie z wykorzystaniem sformułowania Clausiusa	124
Charakterystyki chłodziarek	124
Określanie współczynnika wydajności	126

Rozdział 8: Entropia, czyli koniec Wszechświata 129

Entropia — co to takiego?	129
Entropia w skali mikroskopowej	130
Entropia na poziomie makroskopowym	130
Zasada wzrostu entropii	132

Praca z wykresami T-s	134
Wykorzystywanie zależności T-ds	135
Obliczanie zmiany entropii	136
Substancje czyste	136
Ciecze i ciała stałe	139
Gazy doskonałe	140
Analiza procesów izentropowych	143
Wykorzystywanie stałego ciepła właściwego	143
Wykorzystywanie ciśnienia względnego i objętości względnej	145
Bilansowanie entropii w układzie	147

Rozdział 9: Analiza układów z wykorzystaniem drugiej zasady termodynamiki 149

Pomiar potencjału pracy z wykorzystaniem dostępności energii	150
Określanie zmiany poziomu dostępności	151
Obliczanie poziomu dostępności w układach zamkniętych	151
Obliczanie dostępności w układach otwartych o przepływie stacjonarnym	155
Obliczanie dostępności w układach otwartych o przepływie niestacjonarnym	158
Bilansowanie dostępności układu	160
Transfer dostępności za pomocą procesów pracy	161
Transfer dostępności za pomocą procesów transferu ciepła	161
Transfer dostępności za pośrednictwem przepływu masy	162
Zasada spadku dostępności	162
Praca odwracalna i nieodwracalność	163
Obliczanie wydajności układu z punktu widzenia drugiej zasady termodynamiki	165

Część III: Samoloty, pociągi i samochody

— niech ciepło dla nas pracuje 169

Rozdział 10: Praca z cyklami Carnota i Braytona 171

Analiza idealnego silnika cieplnego — cykl Carnota	172
Badanie czterech procesów w cyklu Carnota	173
Obliczanie sprawności cyklu Carnota	174
Idealny silnik z turbiną gazową — cykl Braytona	175
Badanie czterech procesów w cyklu Braytona	176
Analiza cyklu Braytona	178
Określanie sprawności cyklu Braytona	184
Obliczanie nieodwracalności cyklu Braytona	184
Zwiększanie sprawności cyklu Braytona za pomocą regeneracji	186
Dodawanie do cyklu Braytona chłodzenia międzystopniowego i przegrzewu wtórnego	188
Wpływ chłodzenia międzystopniowego i przegrzewu wtórnego na cykl Braytona	188
Analiza skutków chłodzenia międzystopniowego i przegrzewu wtórnego	190
Zachowanie nieidealne — sprawność rzeczywistego cyklu Braytona	192
Cykl Braytona w locie — napęd odrzutowy	193
Działanie idealnego cyklu turbodozrutowego	194
Analiza cyklu silnika odrzutowego	196

Rozdział 11: Praca z cyklami Otta i Diesla 199

Podstawowe informacje o silnikach tłokowych	199
Idealny silnik z zapłonem iskrowym — cykl Otta	203
Analiza cyklu Otta	203
Obliczanie sprawności cyklu Otta	209
Obliczanie nieodwracalności cyklu Otta	210
Praca z silnikiem o zapłonie sprężeniowym — cykl Diesla	212
Badanie czterech procesów cyklu Diesla	212
Analiza cyklu Diesla	214
Obliczanie sprawności cyklu Diesla	219
Obliczanie nieodwracalności cyklu Diesla	220

Rozdział 12: Praca z cyklami Rankine’a 221

Podstawy cyklu Rankine’a	221
Badanie czterech procesów cyklu Rankine’a	223
Analiza cyklu z wykorzystaniem tablic parametrów pary	225
Obliczanie sprawności cyklu Rankine’a	227
Obliczanie nieodwracalności cyklu Rankine’a	228
Usprawnianie cyklu Rankine’a za pomocą przegrzewu wtórnego	229
Modyfikacja cyklu Rankine’a za pomocą regeneracji	233
Zachowania odbiegające od idealnego — przebieg rzeczywistego cyklu Rankine’a	237

Rozdział 13: Obniżanie temperatury — cykle chłodnicze 241

Podstawy cykli chłodniczych	242
Chłodzenie za pomocą odwrotnego cyklu Braytona	242
Badanie czterech procesów w odwrotnym cyklu Braytona	243
Analiza cyklu przy stałej wartości ciepła właściwego	245
Obliczanie współczynnika wydajności odwrotnego cyklu Braytona	247
Obliczanie nieodwracalności dla chłodziarki cyklu Braytona	247
Chłodzenie za pomocą chłodziarki sprężarkowej	249
Badanie czterech procesów w chłodzience sprężarkowej	250
Analiza cyklu za pomocą tablic parametrów termodynamicznych czynnika chłodniczego	252
Obliczanie współczynnika wydajności chłodziarki sprężarkowej	254
Obliczanie nieodwracalności chłodziarki sprężarkowej	255
Rozgrzewka z pompami ciepła	256
Badanie czterech procesów przebiegających w pompie ciepła	256
Analiza pompy ciepła	258
Obliczanie współczynnika wydajności pompy ciepła	258
Obliczanie nieodwracalności pompy ciepła	259

Część IV: Relacje, reakcje i mieszaniny termodynamiczne 261

Rozdział 14: Zachowania gazów rzeczywistych 263

Zachowanie odbiegające od doskonałego — gaz rzeczywisty	264
Określanie parametrów za pomocą współczynnika ściśliwości	266
Wykorzystywanie zredukowanej temperatury i ciśnienia	268
Wykorzystywanie objętości pseudozredukowanej	269
Ustalanie ciśnienia za pomocą równania van der Waalsa	270

Rozdział 15: Mieszanie gazów obojętnych 273

Określanie parametrów termodynamicznych mieszaniny gazów	274
Wykorzystywanie ułamków masowych i molowych mieszanin gazów	274
Określanie parametrów mieszaniny gazów	276
Współczynnik ściśliwości mieszanin gazów rzeczywistych	277
Założenia dotyczące współczynników ściśliwości mieszanin	278
Ustalanie współczynników ściśliwości za pomocą prawa Amagata	279
Ustalanie współczynników ściśliwości za pomocą prawa Daltona	281
Obliczanie współczynnika ściśliwości za pomocą reguły Kaya	282
Psychrometria — mieszaniny powietrza i pary wodnej	284
Ustalanie temperatury termometru wilgotnego za pomocą psychrometru obrotowego	284
Jest duszno — obliczanie wilgotności właściwej i względnej	285
Zaparowane okulary — punkt rosy	287
Rozwiązywanie problemów związanych z temperaturą i wilgotnością	288
Korzystanie z wykresu psychrometrycznego	289
Komfort dzięki klimatyzacji	292
Ogrzewanie i nawilżanie powietrza	292
Chłodzenie i osuszanie powietrza	294

Rozdział 16: Procesy spalania 299

Równania reakcji spalania	300
Ile potrzeba powietrza — stechiometryczne równania reakcji	301
Nadmiar powietrza w procesie spalania	301
Definiowanie parametrów termodynamicznych związanych ze spalaniem	303
Entalpia tworzenia	303
Entalpia spalania	305
Wykorzystywanie pierwszej zasady termodynamiki w układach spalania o przepływie stacjonarnym	309
Analiza przykładowego układu o przepływie stacjonarnym	310
Wykorzystywanie pierwszej zasady termodynamiki w zamkniętych układach spalania	312
Analiza przykładowego układu zamkniętego	312
Uch, jak gorąco! Określanie adiabatycznej temperatury płomienia	314
Przykład obliczania adiabatycznej temperatury płomienia	315

Część V: Dekalogi 319

Rozdział 17: Dziesięciu słynnych badaczy zagadnień termodynamiki321

George Brayton	321
Nicolas Léonard Sadi Carnot	322
Anders Celsius	322
Rudolf Diesel	322
Daniel Gabriel Fahrenheit	322
James Prescott Joule	323
Nikolaus August Otto	323
William Rankine	323
William Thomson, czyli lord Kelvin	324
James Watt	324

Rozdział 18: Dziesięć innych cykli wartych uwagi325

Silniki dwusuwowe	325
Silniki Wankla	326
Cykl Stirlinga	327
Cykl Ericssona	328
Cykl Atkinsona	328
Cykl Millera	329
Cykl absorpcji	330
Cykl Einsteina	330
Silniki o układzie gazowo-parowym	331
Cykle binarne	332

Dodatek333

Skorowidz343

Rozdział 2

Fundamenty termodynamiki

.....

W tym rozdziale:

- Poznajemy parametry termodynamiczne
 - Odkrywamy, jak wykorzystywać procesy termodynamiczne
 - Zgłębiany zasady termodynamiki
-

Każdy budowniczy wie, jak doniosłe znaczenie ma dobry fundament. Wyobraź sobie budowę domu bez sprawdzenia, czy podłoże jest bezpieczne. W takiej sytuacji przeprowadzenie wszystkiego prawidłowo i zbudowanie domu, który przetrwa próbę czasu, mogłoby być trudne. To samo można powiedzieć o nauce nowego przedmiotu. Każda dziedzina posiada własny żargon, z tego rozdziału dowiesz się więc o pewnych podstawowych pojęciach wykorzystywanych w całym obszarze termodynamiki. Wiele z tych terminów już znasz, wiesz na przykład, czym są „temperatura”, „ciśnienie” i „gęstość”. Inne określenia słyszałeś być może już wcześniej, ale nie wiesz, co dokładnie oznaczają — na przykład „pojemność cieplna właściwa” i „ciepło utajone”. Dodam, że nie poprzestaję tutaj na zdefiniowaniu tych pojęć; omawiam także podstawowe sposoby wykorzystywania ich w dziedzinie termodynamiki.

W ramach termodynamiki procesy są środkami, za pomocą których osiąga się cele — na przykład ogrzanie domu. Dom można ogrzać za pomocą bojlera podgrzewającego wodę, która krąży w rurach i zasila grzejniki, można także wykorzystać piec podgrzewający powietrze i wentylator, który rozprowadzi gorące powietrze po całym wnętrzu domu. Oba procesy prowadzą do tego samego celu, ale ich ścieżki są różne. Aby dostać się z punktu A do punktu B, często możemy wybierać różne drogi, podobne sytuacje mogą się także zdarzać w termodynamice.

W tym rozdziale opisuję koncepcję procesów termodynamicznych i ścieżek wykorzystywanych w ramach tych procesów, aby dotrzeć z punktu A do punktu B. Być może słyszałeś, że w termodynamice istnieją dwie zasady. Prawdę mówiąc, są cztery; dwie mniej znane odnoszą się do temperatury i nie są w zasadzie wykorzystywane do rozwiązywania problemów termodynamicznych. O zasadach termodynamiki traktuje niniejszy rozdział, dowiesz się więc, o co chodzi w całym tym zamieszaniu.

Definiowanie najważniejszych parametrów stanu

Wszystkie materiały, niezależnie od tego, czy są ciałami stałymi, płynami, czy gazami, są opisane parametrami, które informują nas o dwóch kwestiach:

- ✓ Pewne parametry, takie jak pojemność cieplna właściwa, informują, w jaki sposób materiał zachowuje się podczas procesu termodynamicznego.
- ✓ Inne parametry, takie jak temperatura lub ciśnienie, określają, w jakim stanie znajduje się materiał w określonym momencie procesu termodynamicznego.

Załóżmy na przykład, że używasz termoforu do rozgrzania łóżka, zanim się w nim położysz. Woda jest początkowo bardzo ciepła. Możesz posłużyć się parametrami stanu — masą i temperaturą — aby opisać jej stan, gdy napełniasz nią termofor, a następnie po tym, jak rozgrzeje już łóżko. Masa wody w termoforze pozostaje stała, ale jej temperatura obniża się w trakcie procesu.

Inny parametr stanu, pojemność cieplna właściwa, opisuje, jak szybko woda będzie się ochładzać, gdy umieścimy termofor w łóżku. Oznacza to, że informuje nas on, w jaki sposób zachowuje się termofor, ogrzewając łóżko. Więcej informacji o szeregu istotnych parametrów materiałowych znajdziesz w kolejnych podrozdziałach.

Ogólne podstawy pomiarów

Zanim zagłębimy się w problematyce parametrów jako takich, niezbędne jest uzyskanie podstawowej wiedzy o tym, w jaki sposób mierzy się określone właściwości. Jeżeli coś możemy zmierzyć, to mamy do czynienia z **wielkością**. Niektóre wielkości określa się jako **wielkości podstawowe** — są nimi na przykład długość, masa, temperatura i czas. Kiedy łączymy wielkości, aby opisać takie parametry jak objętość, ciśnienie czy energia, mamy do czynienia z **wielkościami pochodnymi**. Wielkości posiadają określone jednostki, takie jak stopnie Celsjusza lub Fahrenheita w przypadku temperatury, metry dla długości i kilogramy dla masy. Jednostki kwantyfikują wartość wielkości.



Niektóre z parametrów nie mają jednostek i te znane są jako wielkości bezwymiarowe. Wielkości bezwymiarowe często bywają wskaźnikami lub ułamkami, w których jednostki wzajemnie się znoszą. Bardzo często spotykaną wielkością bezwymiarową jest na przykład wilgotność względna, którą przedstawia się jako wartość procentową.

Na świecie obowiązują dwa różne układy jednostek:

- ✓ **USCS** — układ ten, najbardziej rozpowszechniony w Stanach Zjednoczonych, krajach Wspólnoty Brytyjskiej i byłych koloniach brytyjskich, jest formalnie nazywany Układem Zwyczajowym Stanów Zjednoczonych, ale ta nazwa jest za długa, przyjęło się więc stosowanie akronimu *USCS* lub po prostu określenia *układ imperialny*.
- ✓ **Système Internationale (SI)** — wszędzie z wyjątkiem krajów Wspólnoty Brytyjskiej i ich byłych kolonii obowiązuje *Système Internationale*. Układ SI bywa często nazywany *układem metrycznym*. Jednostki SI są obecnie najbardziej rozpowszechnionym układem jednostek w podręcznikach termodynamiki, więc właśnie tym układem posługując się w książce.

Dodatkowo parametry stanu dzielą się na dwa rodzaje: **parametry ekstensywne** zależne od masy i **parametry intensywne**, które są od niej niezależne.

- ✓ **Parametr intensywny** — parametr intensywny nie jest zależny od masy. Przykładami parametrów intensywnych są temperatura i ciśnienie. Wartości temperatury i ciśnienia pozostają takie same bez względu na to, jaką ilość materiału dysponujemy.
- ✓ **Parametr ekstensywny** — parametr ekstensywny zależy od masy, czyli od tego, ile mamy materiału. Przykładami parametrów ekstensywnych są masa, objętość i energia.



Nie wszystko jest czarne i białe. Niektóre parametry intensywne są reprezentowane przez parametry ekstensywne dzielone przez jednostkę masy. Takie parametry często bywają określane jako **parametry właściwe**, na przykład objętość właściwa czy energia wewnętrzna właściwa. Parametry intensywne są zwykle przedstawiane za pomocą symboli zapisywanych małą literą. Wyjątek stanowi temperatura (T). Parametry ekstensywne są natomiast zazwyczaj oznaczane symbolami zapisywanymi wielką literą, z wyjątkiem masy (m), którą zapisujemy małą literą. Nie ma to jak wyjątki od reguł, prawda?

Masa

Masa jest w termodynamice parametrem, który opisuje ilość materiału w układzie lub procesie. Wiele osób uważa, że masa jest tym samym co ciężar. To jednak nieprawda. Ciężar to faktyczna siła wywierana na obiekt przez grawitację. Ciężar (Q) obiektu oblicza się, mnożąc jego masę (m) przez przyspieszenie grawitacyjne (g): $Q = m \cdot g$. Na Ziemi przyspieszenie grawitacyjne wynosi 9,81 metra na sekundę do kwadratu (m/s^2).

Jednostką masy w systemie SI jest kilogram (kg), a jednostką ciężaru niuton (N).

Sposób obliczenia ciężaru wskazuje, że wymiar siły (F) jest wynikiem pomnożenia masy (m) i przyspieszenia (a): $F = m \cdot a$. Niuton jest więc definiowany jako $1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot m/s^2$.

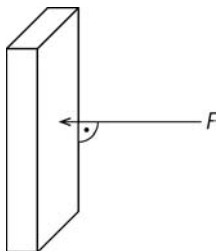
Gdy masa (m) pojawia się jako zmienna w równaniu, oznaczam ją w tej książce kursywą. Gdy pojawia się jednostka oznaczona jako „m”, tak jak w powyższym równaniu, oznacza ona metry i nie jest zapisywana kursywą.



Ciśnienie

Gdy nadmuchamy balon, w jego wnętrzu wzrasta ciśnienie. Ciśnienie powstaje w wyniku zderzeń poruszających się wewnątrz balonu cząsteczek z jego ściankami. Ponieważ cząsteczki zderzają się także z zewnętrzną powierzchnią balonu, na zewnątrz także istnieje ciśnienie. Te zderzenia cząsteczek powodują powstanie siły normalnej do powierzchni balonu. Z rysunku 2.1 widać, że siła normalna to siła prostopadła do powierzchni. **Ciśnienie** definiujemy jako siłę normalną oddziałującą na jednostkę powierzchni. Jest ono parametrem stanu cieczy i gazów. (W przypadku ciał stałych pojęcie to określa się jako *nacisk*).

Rysunek 2.1.
Siła normalna
(F) działa pro-
stopadle do
powierzchni



Na część eksperymentów Blaise'a Pascala z zakresu hydrostatyki w układzie SI jednostką ciśnienia jest paskal (Pa). Jednostkę ciśnienia definiuje się jako jednostkową siłę działającą na jednostkową powierzchnię, a jej zapis matematyczny przedstawia następujące równanie:

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$$

Ponieważ jeden paskal to niezbyt duże ciśnienie, w systemie SI do praktycznych obliczeń inżynierskich wykorzystuje się raczej kilopaskale (kPa):

$$1 \text{ kPa} = 1000 \text{ Pa}$$

A oto informacja pozwalająca umieścić te wartości w określonym kontekście: ciśnienie atmosferyczne na poziomie morza wynosi około 101 kilopaskali.

W skali bezwzględnej punkt zerowy ciśnienia oznacza próżnię doskonałą. Standardowe ciśnienie atmosferyczne definiowane jest w układzie jednostek SI jako 101,325 kPa.

Wartość ciśnienia jest zawsze liczbą dodatnią (w odróżnieniu od temperatury, która w skalach Celsjusza lub Fahrenheita może przyjmować wartości ujemne). Niezbędne do obliczeń wartości ciśnienia w tablicach parametrów termodynamicznych znajdujących się w dodatku na końcu książki są wartościami bezwzględnymi.



Temperatura

Temperatura określa, jak ciepły lub zimny jest jakiś obiekt. Ten parametr stanu jest Ci na pewno dobrze znany. Słuchając prognozy pogody w chłodny i wietrzny zimowy dzień, możesz się dowiedzieć, że temperatura powietrza wynosi -4 stopnie Celsjusza ($^{\circ}\text{C}$), ale zimny wiatr powoduje, że temperatura odczuwalna to aż -10 stopni. Możesz także czuć się komfortowo przy temperaturze powietrza o wartości 20 stopni, ale jeżeli zanurzysz się w wodzie o takiej temperaturze, będzie Ci raczej zimno. Organizm ludzki odczuwa temperaturę, ale nie jest dobrym termometrem.

Kiedy czujemy, że coś jest gorące lub zimne, naprawdę odczuwamy ciepło, które nasza skóra pobiera lub oddaje. Gdy nie ma wiatru, skóra prawie nie oddaje ciepła, ale gdy wieje — oddaje je łatwiej. Dlatego właśnie gdy wieje wiatr, powietrze wydaje się chłodniejsze. Woda pobiera ciepło skuteczniej niż powietrze, więc jest nam w niej zimniej niż na powietrzu. Metalowa powierzchnia jest dla nas zimniejsza niż bawełniana szmatka, bo szybciej oddaje ciepło.



Temperatura jest tak naprawdę pojęciem wykorzystywanym do opisu kierunku, w którym odbywa się przepływ ciepła. Ciepło jest formą energii, która w naturalny sposób jest przekazywana z ośrodka o temperaturze wyższej do ośrodka o temperaturze niższej. Przekazywanie ciepła możemy poczuć, znajdując się w otoczeniu cieplejszym lub zimniejszym niż temperatura naszego ciała. W temperaturze zera absolutnego nie można już wydobyć ciepła z materiału, ponieważ nie posiada on energii. Zagadnienia energii omawiam szczegółowo dalej, w podrozdziale „Energia”.

Do pomiaru temperatury powszechnie wykorzystuje się cztery różne skale.

- ✓ **Skala Celsjusza (°C).** Opracowana przez Andersa Celsiusa, definiuje 100 równomiernie rozłożonych punktów lub stopni pomiędzy punktami wrzenia i zamarzania wody pod ciśnieniem 1 atmosfery (atm).
- ✓ **Skala Fahrenheita (°F).** Gabriel Fahrenheit punktem zerowym swojej skali uczynił wartość temperatury zamarzania mieszaniny wody z solą. Drugim punktem skali stała się temperatura ludzkiego ciała (którą uczony oszacował na 96 stopni). Po zestawieniu skali okazało się, że woda zamarza w temperaturze około 32 stopni i wrze przy mniej więcej 212 stopniach. Fahrenheitowi nigdy nie przyszło do głowy, że pewnego dnia skala temperatury zostanie powiązana z punktami zamarzania i wrzenia czystej wody.
- ✓ **Skala Kelvina (K).** William Thompson, Szkot znany jako lord Kelvin, zasugerował potrzebę stworzenia bezwzględnej skali temperatury, definiując temperaturę zerową jako miejsce, w którym występuje zerowa wartość energii. Swoją skalę oparł na skali Celsjusza i wyliczył, że punkt zamarzania wody wynosi 273,15 kelwina (co w obliczeniach zwykle zaokrągla się do 273 kelwinów).
- ✓ **Skala Rankine’a (°R).** W systemie Williama Rankine’a, skali bezwzględnej opartej na skali Fahrenheita, temperatura zamarzania wody to 459,67 stopnia. W obliczeniach zazwyczaj zaokrągla się tę wartość do 460 stopni.

Zwróć uwagę, że w skali Kelvina nie występuje symbol stopni, który został zeń usunięty w roku 1967.



Bezwzględne skale temperatury Kelvina lub Rankine’a stosuje się wyłącznie w przypadku wykorzystywania równania gazu doskonałego (które prezentuję w rozdziale 3.). *Równanie gazu doskonałego* opiera się na zależnościach pomiędzy ciśnieniem, temperaturą i objętością. Punktem wyjścia dla tych zależności jest zero bezwzględne, wartość, która umożliwia prawidłowe zestawienie skal ciśnienia i objętości ze skalą temperatury.

Gdy obliczenia dotyczą różnic temperatur, możemy posługiwać się skalami Celsjusza lub Fahrenheita. Nie można ich jednak używać, gdy obliczamy stosunek temperatur. W przypadku wątpliwości, którą skalę powinniśmy wykorzystać, nie popełnimy błędu, stosując skalę Kelvina lub Rankine’a.



Do przeliczenia danej skali temperatury na inną wystarczą trzy wzory. Aby dokonać innych przeliczeń, na przykład kelwinów na stopnie Celsjusza lub stopni Rankine’a na stopnie Fahrenheita, można je po prostu przekształcić.

- ✓ **Stopnie Celsjusza na stopnie Fahrenheita:** $t [^{\circ}\text{F}] = 1,8 \cdot t [^{\circ}\text{C}] + 32$.
- ✓ **Stopnie Celsjusza na kelwiny:** $t [^{\circ}\text{C}] = T [\text{K}] - 273,15$. Pamiętaj, że jeżeli chcesz, możesz po prostu zaokrąglić 273,15 do wartości 273. Nie zmieni to w znaczącym stopniu wyniku końcowego.



- ✓ **Stopnie Fahrenheita na stopnie Rankine’a:** $t [^{\circ}\text{F}] = t [^{\circ}\text{R}] - 459,67$.
Oczywiście można zaokrąglić 459,67 do 460 bez znaczącej utraty dokładności.

Gdy obliczamy różnicę temperatur, zmiana wartości w stopniach Celsjusza jest równa zmianie tejże wartości w kelwinach: $\Delta t [^{\circ}\text{C}] = \Delta T [\text{K}]$. To samo odnosi się do jednostek angielskich; zmiana o jeden stopień w skali Fahrenheita jest równa zmianie o jeden stopień w skali Rankine’a: $\Delta t [^{\circ}\text{F}] = \Delta t [^{\circ}\text{R}]$. Nie popełnij błędu i nie dodawaj 273 do wartości zmiany w stopniach Celsjusza, aby uzyskać wartość zmiany w kelwinach, lub 460 do wartości zmiany w stopniach Fahrenheita, aby uzyskać wartość zmiany w stopniach Rankine’a.

Gęstość

Gęstość to masa materiału przypadająca na jednostkę objętości. Gęstość (ρ) określa się, dzieląc masę (m) materiału przez objętość (V), jaką ona zajmuje. W układzie SI jednostką gęstości jest kilogram na metr sześcienny (kg/m^3). Gęstość materiału jednorodnego obliczamy za pomocą równania: $\rho = m/V$.

Ciecze są często uważane za nieściśliwe, bo ich gęstość nie zmienia się znacząco pod wpływem temperatury i ciśnienia. Gęstość gazów zależy z kolei zarówno od temperatury, jak i ciśnienia w znaczącym stopniu. Efekt ten w odniesieniu do równania gazu doskonałego omawiam w rozdziale 3.

Wykorzystując odwrotność gęstości, otrzymujemy **objętość właściwą** (v). Objętość właściwa stosowana jest w równaniach stanu gazu doskonałego, które omawiam w rozdziale 3. Objętość właściwa jest parametrem intensywnym. To objętość na jednostkę masy. Jej jednostkami są w systemie SI metry sześciennic na kilogram (m^3/kg). Objętość właściwą obliczamy za pomocą następującego równania: $v = V/m = 1/\rho$.

Czasami gęstość materiału w tablicy parametrów stanu podaje się jako **gęstość względną**, co oznacza, że gęstość materiału dzielona jest przez gęstość wody w temperaturze 4 stopni Celsjusza, która wynosi 1000 kilogramów na metr sześcienny. Gęstość względną materiału obliczamy za pomocą następującego równania:

$$\rho_{\text{wzgl.}} = \frac{\rho}{\rho_{H_2O}}$$

Ponieważ gęstość względna to ujęty w postaci ułamka stosunek dwóch gęstości, jest to wielkość bezwymiarowa. Gdy mamy do czynienia z ułamkiem zbudowanym z dwóch identycznych parametrów, ich jednostki wzajemnie się znoszą, wobec czego staje się on bezwymiarowy.

Gęstość względna wody w temperaturze pokojowej wynosi około 1,0, ponieważ jednak gęstość, nawet w przypadku cieczy, może się zmieniać w zależności od temperatury i ciśnienia, więc także gęstość wody może się nieco różnić w różnych warunkach. Jeżeli na przykład woda ma temperaturę 100 stopni Celsjusza, jej gęstość wynosi 958 kilogramów na metr sześcienny, więc w temperaturze 100 stopni Celsjusza gęstość względna wody wynosi 0,958. Jeżeli materiał lub substancja ma gęstość względną mniejszą niż 1,0, to unosi się na wodzie. Gdy gęstość względna jest większa od 1,0, materiał w wodzie tonie.



Kolejnym parametrem związanym z gęstością, a odnoszącym się do cieczy i ciał stałych, jest **ciężar właściwy** (γ) materiału. Możemy się z nim zetknąć na przykład przy określaniu energii potencjalnej słupa cieczy. Aby uzyskać wartość ciężaru właściwego, mnożymy gęstość materiału (ρ) przez przyspieszenie ziemskie (g): $\gamma = \rho g$. W układzie SI jednostką są niutony na metr sześcienny (N/m^3).

W tym przypadku zastosowanie określenia „właściwy” jest wyjątkiem od reguły „na jednostkę masy”. To parametr „na jednostkę objętości”, choć w pierwszej chwili można byłoby uznać, że odnosi się do masy materiału.

Energia

Energia to znajome pojęcie — zapewne intuicyjnie zdajesz sobie sprawę, czym ona jest i do czego służy — ale jak ją zdefiniować? Można ją potraktować jako zdolność układu fizycznego do dokonania zmiany w innym układzie fizycznym. Przez układ fizyczny rozumiem układ o jakiegokolwiek wielkości, poczynając od cząstek elementarnych, a kończąc na Wszechświecie jako całości — z wszystkim wiąże się więc jakaś forma energii.

W przypadku termodynamiki energia może być przekazywana z jednego układu do innego za pośrednictwem pracy, transferu ciepła i transferu masy. Człowiek (jako układ fizyczny) wykorzystuje energię, aby wyjąć torbę z zakupami (inny układ fizyczny) z samochodu — to praca. Włączamy piekarnik (konkretny układ fizyczny), a energia piecze dla nas blachę ciastek (inny układ fizyczny) z wykorzystaniem przekazywania ciepła. Rzeką (układ fizyczny) wpływa do zbiornika (innego układu fizycznego) i zwiększa energię tego zbiornika za sprawą dostarczenia masy.

Energia występuje w wielu różnych formach, a jakość oraz ilość energii układu fizycznego zależą od stanu fizycznego tego układu w układzie odniesienia. Szereg form energii i ich układów odniesienia omawiam w kolejnych fragmentach książki.

Jakość energii oznacza zdolność układu do wykonania pracy lub do bycia użytecznym w inny sposób. Energia procesu spalania ma na przykład wysoką jakość (w stosunku do otoczenia) i może być wykorzystywana do napędzania silników samochodowych. Jakość energii zawartej w spalinach jest relatywnie niższa niż tej z procesu spalania i nie jest ona już użyteczna dla silnika. Spaliny mają wyższą temperaturę od otoczenia, mają więc większą niż ono energię. Teoretycznie więc energię spalin można byłoby wykorzystać do czegoś pożytecznego. Układem odniesienia dla ilości energii często bywa otoczenie.

Z punktu widzenia termodynamiki energię można podzielić ogólnie na makroskopową i mikroskopową. **Energia całkowita** (E) układu to suma energii z obu tych grup.

- ✓ **Energia makroskopowa.** Układ posiada *energię makroskopową*, gdy może się poruszać w układzie odniesienia w wyniku działania siły zewnętrznej, takiej jak grawitacja, siła Lorenza (związana z polem magnetycznym) lub siła elektrostatyczna (związana z polem elektrycznym). Typowymi formami energii makroskopowej są energia kinetyczna i energia potencjalna. Spychacz posiada na przykład energię makroskopową, gdy przesuwamy stertę ziemi. Pozytywną cechą energii makroskopowej jest to, że może ona zostać wykorzystana do wykonania pracy. W termodynamice praca definiowana jest jako przemieszczanie ciała na określonej drodze w wyniku działania siły. Pracę omawiam szczegółowo w rozdziale 4.

- ✓ **Energia mikroskopowa.** To energia układu, która posiada wiele form i funkcjonuje w skali molekularnej. Poszczególne cząsteczki posiadają energię kinetyczną ruchu obrotowego, postępowego i drgań. Połączenie wszystkich form energii molekularnej nazywamy **energiją wewnętrzną**. Energia wewnętrzna zależy od stopnia aktywności molekularnej układu i może być wykorzystywana lub przekształcana do postaci umożliwiającej zapewnienie jej użyteczności w skali makroskopowej. Parę wodną można na przykład ogrzać pod wysokim ciśnieniem, aby przepuszczona przez turbinę wykonała pracę. Gdy jeden układ ma wyższą temperaturę od innego, może między nimi dojść do przekazania ciepła, czyli zmiany ich energii mikroskopowych. Kwestie ciepła omawiam szczegółowo w rozdziale 4. Energia mikroskopowa nie zależy także od żadnego zewnętrznego układu odniesienia.



W układzie SI jednostką energii jest dżul (J). Jeden dżul to ilość energii potrzebna do przesunięcia punktu przyłożenia siły 1 niutona na drodze 1 metra. W przypadku energii elektrycznej dżul to także ilość pracy, jaką można uzyskać z 1 wata mocy w ciągu 1 sekundy.

W kolejnych punktach przedstawiam różne rodzaje energii, które można napotkać podczas zgłębiania termodynamiki, oraz opisuję, w jaki sposób oblicza się energię całkowitą układu (E).

Energia kinetyczna

Energia kinetyczna to energia związana z masą przemieszczającą się względem układu odniesienia. W wielu przypadkach układem odniesienia jest ziemia, bo pozostaje nieruchoma. Dla samolotu, ptaka albo Supermana bardziej odpowiednim układem odniesienia mogłoby być jednak powietrze. Energię kinetyczną (E_k) obiektu o masie (m) poruszającego się względem układu odniesienia z prędkością (v) obliczamy, stosując następujące równanie:

$$E_k = \frac{mv^2}{2}$$

Gdy na przykład rzucimy standardową piłkę baseballową ważącą 0,14 kilograma z prędkością 35,8 metra na sekundę, jej energia kinetyczna wyniesie:

$$E_k = 1/2 \cdot (0,14 \text{ kg}) \cdot (35,8 \text{ m/s})^2 = 89,7 \text{ J}$$

Kiedy obliczamy energię kinetyczną, jednostkami w równaniu są $\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2$, które są równoznaczne z dżulami.

Poniższe jednostki energii są sobie równoważne:

$$1000 \text{ J} = 1 \text{ kJ}$$

$$1 \text{ kJ} = 1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2 = 1000 \text{ N} \cdot \text{m} = 1 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3$$



Ile energii zawiera pączek?

Jedną z powszechnie stosowanych jednostek energii jest **kaloria**. Początkowo określano ją jako ilość energii potrzebną do ogrzania jednego grama wody o jeden stopień Celsjusza. Ponieważ jednak ilość energii potrzebnej do ogrzania wody zależy od temperatury, obecnie definiuje się kalorię jako ciepło właściwe wody w temperaturze 15 stopni Celsjusza (ciepło właściwe omawiam w kolejnym podrozdziale).

Kilokaloria (1000 kalorii) to wielkość wykorzystywana w dietetyce do określania wartości energetycznej pożywienia. Przeciętny pączek, mający 320 kalorii, posiada wystarczającą energię, aby podnieść temperaturę 32 kilogramów wody o około 10 stopni Celsjusza. Być może teraz głęboko się zastanowisz przed zjedzeniem jeszcze jednego pączka.

Energia potencjalna

Energia potencjalna to forma energii związana z masą znajdującą się powyżej poziomu odniesienia. Masa dysponuje potencjałem do wykonania pracy, gdy przemieszcza się w dół w polu grawitacyjnym. Poziomem odniesienia dla energii potencjalnej często bywa poziom ziemi, ale o zmianie energii potencjalnej możemy mówić przy różnicy dowolnych poziomów.

Energię potencjalną (E_p) obiektu o masie (m) na wysokości (h) nad poziomem odniesienia w układzie z przyspieszeniem grawitacyjnym (g) można obliczyć za pomocą następującego równania:

$$E_p = m \cdot g \cdot h$$

Załóżmy, że nakręcasz stary zegar. Jego wagi mają po 2 kilogramy, unosisz je o 30 centymetrów. Ustalmy, jaką energię potencjalną mają wagi umożliwiające działanie zegara:

$$E_p = 2 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 0,30 \text{ m} = 5,9 \text{ J}$$

Weryfikację poprawności jednostek w tym równaniu możesz przeprowadzić za pomocą przeliczeń jednostek równoważnych, które przedstawiłem wcześniej.

Energia wewnętrzna

Energia wewnętrzna wiąże się z ruchem oraz budową cząsteczkową substancji. Ruchy obrotowy, postępowy i drgania cząstek i atomów substancji wzrastają, gdy do układu doprowadzana jest energia. Zmiana energii kinetycznej cząsteczek często powoduje zmianę temperatury substancji. Tę formę energii wewnętrznej nazywamy **energią jawną**, bo można ją określić za pomocą termometru. Symbolem energii wewnętrznej jest U .

Gdy do układu dostarczona zostaje energia, struktura cząsteczkowa substancji może się zmieniać — substancja może się na przykład topić lub parować. Cząsteczki i atomy substancji utrzymują różnorodne siły. Te *siły wiążące* są najsilniejsze w ciałach stałych i dlatego właśnie ciała stałe zachowują swój kształt. Siły wiążące w cieczach są słabsze, co sprawia, że ciecze się nie rozpraszają, ale zmieniają kształt i wypełniają pojemniki. W gazach siły wiążące są najsłabsze; gaz rozszerza się swobodnie, dopóki nie wypełni zamkniętego pojemnika. Poszczególne formy energii wewnętrznej wpływają na różne rodzaje sił wiążących:

- ✓ **Energia utajona** — do przemiany fazowej substancji (na przykład gdy ciało stałe topi się i staje się cieczą) dochodzi, gdy pod wpływem dostarczania ciepła następuje zerwanie wiązań molekularnych. Energię wymaganą do zerwania tych wiązań nazywamy **energiją utajoną**, ponieważ do substancji doprowadzana jest energia cieplna, ale temperatura tej substancji w trakcie procesu przemiany fazowej się nie zmienia. Termometr nie wykrywa energii doprowadzanej podczas zmiany fazy, więc energia ta jest „ukryta” czy też właśnie *utajona*. Więcej informacji o przemianach fazowych znajdziesz w rozdziale 3. Energia utajona przyjmuje różne nazwy w zależności od rodzajów przemian fazowych:
 - Gdy płyn zamarza (lub się topi), energię utajoną nazywamy **ciepłem utajonym topnienia** (h_{sf}). Litera „s” w indeksie oznacza ciało stałe, a litera „f” oznacza ciecz.
 - Gdy ciecz paruje (lub się skrapla), energię tę nazywamy **ciepłem utajonym parowania** (h_{fg}). Litera „f” w indeksie dolnym oznacza ciecz, a litera „g” oznacza gaz.
 - Gdy ciało stałe paruje bezpośrednio do postaci gazu (jak w przypadku suchego lodu), omawianą energię nazywamy **ciepłem utajonym sublimacji** (h_{sg}). Litera „s” w indeksie oznacza ciało stałe, a litera „g” to gaz.
- ✓ **Energia chemiczna** — jest wykorzystywana w reakcjach spalania paliw. W procesie spalania paliwa pewne wiązania chemiczne są niszczone, a tworzą się inne. Może to uwalniać energię zgromadzoną w wiązaniach cząsteczkowych palnego materiału. Energia chemiczna występuje w każdej reakcji chemicznej, ale nie wszystkie reakcje chemiczne są przedmiotem zainteresowania termodynamiki. Energię chemiczną związaną z typowymi procesami spalania omawiam w rozdziale 16.
- ✓ **Energia jądrowa** — ten rodzaj energii jest jedną z najsilniejszych form energii molekularnej, ponieważ jest związany z jądrami atomów. Ta forma energii nie jest przedmiotem kursu termodynamiki na tym poziomie, ale przynajmniej wiesz już, że istnieje.

Obliczanie energii całkowitej

Całkowita ilość energii zawarta w układzie obejmuje zarówno jej formy makroskopowe, jak i mikroskopowe. Poniższe równania energii całkowitej zestawiają energię kinetyczną, potencjalną i wewnętrzną. Postać ekstensywna całkowitej energii układu uwzględnia w każdym z komponentów energii masę układu. Postać intensywna oparta jest na jednostce masy.

$$E = E_k + E_p + U = 1/2 m \cdot v^2 + m \cdot g \cdot h + m \cdot u \text{ (forma ekstensywna)}$$

$$e = e_k + e_p + u = 1/2 v^2 + g \cdot h + u \text{ (forma intensywna)}$$

Jedno z tych dwóch równań jest składnikiem prawie każdej analizy termodynamicznej. Używa się ich do określenia ilości energii, która występuje w postaci pracy i ciepła w wielu procesach termodynamicznych. Ponieważ energie chemiczna i jądrowa nie bywają zwykle przedmiotem rozważań kursu wprowadzającego do zagadnień termodynamiki, więc te formy energii zostały w równaniach służących do obliczania całkowitej energii układu pominięte.

Entalpia

Wiele procesów termodynamicznych wiąże się z przepływem cieczy przez jakieś urządzenie i zachodzącymi w niej przemianami energii wewnętrznej. Gdy ciecz wpływa do układu, to wykonuje pracę w układzie, a gdy wypływa, układ wykonuje pracę nad cieczą. Dzieje się tak na przykład w sytuacji, gdy gorąca woda przepływa przez chłodnicę samochodową. Wartość pracy związanej z wpływaniem cieczy do układu lub wypływaniem z niego określa iloczyn ciśnienia (p) i objętości (V) cieczy. Tego rodzaju sytuacje zdarzają się wyjątkowo często, więc dla ułatwienia obliczeń wprowadzono nowy parametr, **entalpię** (H), łączący zmianę energii wewnętrznej z działaniem przepływu. Entalpię definiuje następujące równanie: $H = U + pV$. Jednostki entalpii są takie same jak w przypadku energii wewnętrznej. Jednostkami dla iloczynu ciśnienia i objętości (pV) są w układzie SI kilopaskale razy metry sześciennne ($\text{kPa} \cdot \text{m}^3$), równoważne z kilodżulami (kJ). Entalpię wykorzystuje się do opisu takich układów termodynamicznych jak turbiny, sprężarki, dysze i wymienniki ciepła. Te interesujące urządzenia omawiam w rozdziale 6.

Ciepło właściwe

Doprowadzenie do wrzenia wody w wielkim garncu, niezależnie od tego, czy mu się przyglądamy, czy nie, może zająć sporo czasu. Poziom nagrzewania się materiału, któremu dostarczymy pewną ilość energii, określa parametr stanu o nazwie **ciepło właściwe**.

Ogrzewanie ciał stałych i cieczy

Istnieją materiały, które zmieniają temperaturę szybko, bo do ich podgrzania nie potrzeba dużych ilości energii; inne potrzebują jej dużo. Ustalenie, ile energii wymaga doprowadzenie do zmiany temperatury ciał stałych i ciekłych w oparciu o ich masę (m) i ciepło właściwe (c), umożliwia następujące równanie: $U_2 - U_1 = m \cdot c(T_2 - T_1)$. Energia dostarczana materiałowi zmienia wartość jego energii wewnętrznej ($U_2 - U_1$). Wartości ciepła właściwego szeregu powszechnie wykorzystywanych cieczy i ciał stałych znajdziesz w tablicy A.10 w „Dodatku”.

Podczas podgrzewania (lub schładzania) materiału temperaturę początkową i energię wewnętrzną materiału oznaczają odpowiednio symbole T_1 i U_1 . Końcowa temperatura i energia wewnętrzna to odpowiednio T_2 i U_2 . W układzie SI jednostkami ciepła właściwego są kilodżule na kilogram-kelwin ($\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$).

Ciepło właściwe zmienia się wraz z temperaturą, więc nasze równanie traci nieco na dokładności w przypadku dużych różnic między T_1 i T_2 . Dokładność można poprawić, uśredniając wartość temperatury.

Możemy teraz na przykład obliczyć ilość energii potrzebną do podgrzania kubka wody na herbatę. Przyjmijmy, że kubek wody o masie 200 gramów (0,2 kilograma) podgrzewamy od 22 do 100 stopni Celsjusza. Ciepło właściwe wody wynosi 4,18 kilodżuli na kilogram-kelwin. Zmiana wartości energii wewnętrznej wody jest równa ilości energii, którą do niej doprowadzamy, więc wynik to $U_2 - U_1 = 0,2 \text{ kg} \cdot 4,18 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} \cdot (100 - 22)^\circ\text{C} = 65,2 \text{ kJ}$.



Podgrzewanie gazów

Gazy posiadają dwa różne rodzaje ciepła właściwego, a to, który rodzaj wykorzystujemy, zależy od warunków, w jakich energia jest wprowadzana do gazu lub z niego usuwana. Różni to gazy od ciał stałych i cieczy, które posiadają tylko jedną wartość ciepła właściwego. Równania ciepła właściwego gazów są bardzo podobne do równań dla ciał stałych i cieczy.

- ✓ **Ciepło właściwe przy stałej objętości** — jeżeli podgrzewamy gaz w sztywnym pojemniku, objętość pozostaje stała, więc wykorzystujemy ciepło właściwe przy stałej objętości (c_V). Ciepło właściwe przy stałej objętości łączy zmianę temperatury w procesie ze zmianą energii wewnętrznej, zgodnie z następującym równaniem:

$$U_2 - U_1 = m \cdot c_V(T_2 - T_1)$$

W tym równaniu zakładamy, że ciepło właściwe pozostaje stałe w trakcie trwania procesu. Dokładność równania poprawia się, gdy odnosimy ciepło właściwe do średniej temperatury procesu.

- ✓ **Ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu** — jeżeli podgrzewamy gaz w procesie o stałym ciśnieniu, wykorzystujemy ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu (c_p). W przypadku procesu ze stałym ciśnieniem entalpia gazu ($H_2 - H_1$) ulega zmianie, bo gaz, oprócz zmiany energii wewnętrznej, musi wykonać pracę. Ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu łączy zmianę temperatury w procesie ze zmianą entalpii w następującym równaniu:

$$H_2 - H_1 = m \cdot c_p(T_2 - T_1)$$

W tym równaniu zakładamy, że ciepło właściwe pozostaje na stałym poziomie. Dokładność równania poprawia się, gdy odnosimy ciepło właściwe do średniej temperatury procesu.

Dwa różne parametry ciepła właściwego łączy ze sobą stała gazowa (R). Stała gazowa dla powietrza wynosi 0,287 kilodżuła na kilogram-kelwin. Stałą gazową definiuje równanie stanu gazu doskonałego, co szczegółowo omawiam w rozdziale 3. Zależność pomiędzy c_V i c_p ilustruje następujące równanie: $c_p = c_V + R$.

Innym ważnym parametrem gazu doskonałego jest tak zwany **stosunek ciepła właściwych** (κ). Za pomocą tego współczynnika można oceniać procesy termodynamiczne przebiegające w sprężarkach, turbinach i silnikach tłokowych. Omawiany parametr określa następujące równanie:

$$\kappa = \frac{c_p}{c_V}$$

Stosunek ciepła właściwych dla powietrza wynosi około 1,4. Nie jest to parametr o stałej wartości; jego wartość zwiększa się zazwyczaj wraz ze wzrostem temperatury, bo także zmiany ciepła właściwego wiążą się ze zmianami temperatury.

Entropia

Entropia jest miarą uporządkowania lub nieuporządkowania, w zależności od tego, czy szklanka jest dla Ciebie zawsze w połowie pełna, czy w połowie pusta. Entropia jest chyba najbardziej niezwykłą funkcją stanu, bo ma także zastosowanie w bardzo wielu

sytuacjach niezwiązanych z termodynamiką. Idealnym układem opisywanym za pomocą entropii mogłoby być na przykład biurko, na którym pojawiają się coraz to nowe dokumenty, tworząc sterty i sprawiając, że powstaje coraz większy bałagan — czyli dochodzi do wzrostu entropii. Odwrócenie skutków entropii wymaga zwykle zorganizowanego wysiłku. Aby zmniejszyć poziom entropii na biurku, ktoś musi wykonać określoną pracę.

Gdy coś jest bardzo dobrze uporządkowane, entropia jest niska. Sprzątając w pokoju, wprowadzamy go w stan niskiej entropii. Z drugiej strony, wysoka wartość entropii wskazuje na chaos lub nieuporządkowanie. Z punktu widzenia termodynamiki poziom entropii jest zwykle niski w niskich temperaturach i wysoki w wysokich. Wyobraźmy sobie na przykład cząsteczkę: w niskich temperaturach są uporządkowane, a zakres ich ruchów jest niewielki. Entropia jest niska. Po podgrzaniu cząsteczki zaczynają się jednak poruszać, jakby były na wieczorku tanecznym, i entropia wzrasta. Do określenia wartości entropii służy druga zasada termodynamiki (zob. rozdziały 8. i 9.).

Na entropię wpływa także ciśnienie. Wysokie ciśnienie wykazuje tendencję do zmniejszania poziomu entropii, w przeciwieństwie do niskiego. Entropia jest więc parametrem nieco skomplikowanym, ponieważ zależy zarówno od temperatury, jak i ciśnienia. Entropia informuje nas, na ile efektywnie w układach i procesach termodynamicznych wykorzystywana jest energia. Entropia nieefektywnych układów rośnie, czyli zwiększa się w nich bałagan.

Procesy termodynamiczne

Gdy pompujemy oponę rowerową, parzymy kawę w dzbanku czy napełniamy wannę gorącą wodą, przeprowadzamy proces termodynamiczny. Gdy jedziemy samochodem, łańcuch procesów termodynamicznych przebiega w silniku. Włączając światło w mieszkaniu, uruchamiamy procesy termodynamiczne, które sprawiają, że elektrownia zaopatruje nas w energię elektryczną.

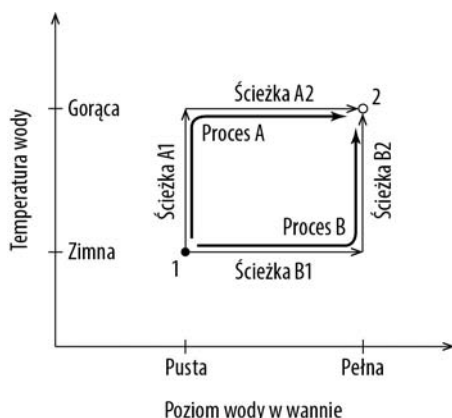
Proces termodynamiczny jest po prostu sposobem opisu przemian układu, który z danego stanu przechodzi w inny. **Układ** to zasób materiału, który badamy lub analizujemy w ramach problemu. **Stan** określa parametry materiału na początku i na końcu procesu. Każdy układ podlegający procesowi termodynamicznemu znajduje się w środowisku, zwanym także **otoczeniem**. Układ i jego otoczenie rozdziela wyobrażona linia, zwana **granicą**. Granica może istnieć fizycznie lub być wyobrażona. W zależności od rodzaju procesu granica może pozostawać nieruchoma lub może się poruszać.

Procesy pomagają poprawnie analizować problemy termodynamiczne. Przeprowadzając analizę termodynamiczną pompowania opony rowerowej, definiujemy powietrze wewnątrz opony jako układ. Wszystko, co znajduje się na zewnątrz opony, stanowi otoczenie. Przed rozpoczęciem pompowania opony powietrze wewnątrz niej ma określoną temperaturę i ciśnienie. Posiada także określoną energię wewnętrzną, zależną od temperatury. Warunki te opisują stan początkowy procesu. Po zakończeniu pompowania opona będzie miała inną temperaturę, ciśnienie i energię wewnętrzną. Te warunki będą opisywały stan końcowy procesu. Granicę pomiędzy powietrzem wewnątrz opony i otoczeniem stanowi sama opona. Pompowanie opony powoduje zmianę jej kształtu, więc granica w tym procesie jest ruchoma.

Więcej o procesach termodynamicznych dowiesz się z kolejnych sekcji.

Tworzenie ścieżki procesu

W celu przeprowadzenia analizy procesu termodynamicznego należy zdefiniować jego ścieżkę. W dziedzinie termodynamiki *ścieżka* określa, w jaki sposób proces zmienia układ, powodując jego przejście z danego stanu do innego. Wyobraź sobie, że masz zamiar wziąć kąpiel. W takiej sytuacji możesz na przykład podgrzać wodę, a następnie napełnić wannę wodą już gorącą. Proces ten, oznaczony literą A, widać na rysunku 2.2. Innym sposobem postępowania mogłoby być napełnienie wanny zimną wodą, a następnie podgrzanie wody, gdy wanna będzie pełna (proces B na rysunku 2.2). Punkt początkowy i końcowy na rysunku 2.2 są takie same, ale oba procesy podążają od rozpoczęcia do zakończenia innymi ścieżkami.



Rysunek 2.2.
Korzystanie
z dwóch róż-
nych ścieżek do
przygotowania
kąpeli

Analiza termodynamiczna jest najłatwiejsza, gdy podstawą ścieżki jest parametr, który pozostaje stały. Wykres na rysunku 2.2 definiuje na przykład dwa parametry: poziom napełnienia wanny i temperaturę wody. Proces A zaczyna się od pustej wanny i podgrzania wody przed jej napełnieniem, a więc proces A zaczyna się od ścieżki A1. Na ścieżce A1 poziom wody jest stały, wanna pozostaje pusta podczas podgrzewania wody. Po podgrzaniu wody proces A zaczyna podążać ścieżką A2, w ramach której wanna jest napełniana gorącą wodą. Na tej ścieżce podczas napełniania wanny na stałym poziomie pozostaje temperatura wody.

W analizach termodynamicznych silników cieplnych i urządzeń chłodniczych, zawartych w rozdziałach 10. – 13., wykorzystywanych jest wiele różnych rodzajów ścieżek:

- ✓ W przypadku ścieżki *izochorycznej* lub *izometrycznej* stała jest objętość.
- ✓ W przypadku ścieżki *izobarycznej* stałe jest ciśnienie.
- ✓ W przypadku ścieżki *izotermicznej* stała jest temperatura.
- ✓ W przypadku ścieżki *izentalpowej* stała jest entalpia.
- ✓ W przypadku ścieżki *izentropowej* stała jest entropia.
- ✓ W przypadku ścieżki *adiabatycznej* nie występuje wymiana ciepła.
- ✓ W przypadku ścieżki *odwracalnej* następuje powrót do stanu początkowego bez zmian.

W analizie termodynamicznej zakładamy, że każda z tych różnych ścieżek przebiega w warunkach idealnych, czyli że parametry układu pozostają podczas procesu jednolite. Wiadomo jednak oczywiście, że w przypadku procesu przebiegającego szybko parametry układu wcale nie muszą takie być. Pomyśl o silniku swojego samochodu. Silnik pracuje z dużą prędkością obrotową, a cylindry szybko spalają paliwo. Analizując silnik samochodowy, zakładamy, że temperatura i ciśnienie wewnątrz cylindra są jednolite, ale wiemy, że nie jest to prawda. To uproszczenie służące ułatwieniu analizy.

Ustalanie stanu na każdym z końców ścieżki — postulat stanu

Słynny poeta Robert Frost napisał kiedyś:

*Zdarzyło mi się niegdyś ujrzeć w lesie rano
Dwie drogi: pojechałem tą mniej uczęszczaną —
Reszta wzięła się z tego, że to ja wybrałem.*

Ten wiersz przywołuje obraz wyboru ścieżki i dotarcia do miejsca przeznaczenia. Pomiędzy początkiem i końcem drogi stan naszego umysłu może ulec całkowitej zmianie. Ta koncepcja ujawnia się w każdym procesie termodynamicznym.

Stan określa parametry (takie jak temperatura i ciśnienie) układu lub substancji w poszczególnych punktach procesu termodynamicznego. Opisuje on układ przed rozpoczęciem procesu i po jego zakończeniu. Każdy proces ma stan początkowy i stan końcowy. Bez funkcji stanu nie wiedzielibyśmy, gdzie proces się zaczyna i gdzie się kończy. Liczbę parametrów niezbędnych do opisanie stanu układu określa **postulat stanu**. Postulat stanu stwierdza: do całkowitego zdefiniowania stanu układu prostego ściśliwego niezbędne są dwa niezależne parametry intensywne.



W opisie układu prostego ściśliwego nie uwzględnia się energii kinetycznej i potencjalnej ani energii z pól magnetycznych lub elektrycznych. Jeżeli te formy energii występują w procesie, należy oprócz dwóch parametrów wymaganych przez postulat stanu określić także parametry związane z tymi formami energii.

Parametry są niezależne, gdy zmiana jednego nie powoduje zmiany innego. Widać to na rysunku 2.2, na którym każda ze ścieżek umożliwia zmianę jednego parametru, podczas gdy drugi pozostaje stały. Wśród wielu parametrów stanu zawsze niezależne od siebie są temperatura i objętość właściwa. W większości przypadków niezależne od siebie są temperatura i ciśnienie, wyjątkiem jest sytuacja, gdy następuje zmiana fazy w procesie o stałym ciśnieniu. Jeżeli podczas procesu przemiany fazowej ciśnienie jest stałe, wtedy stała pozostaje także temperatura. Objętość właściwa zmienia się podczas zmiany fazy przy stałym ciśnieniu, więc może być drugim parametrem niezależnym. W przypadku przemiany fazowej w sztywnym pojemniku objętość właściwa pozostaje stała, natomiast zmianom ulegają wartości zarówno ciśnienia, jak i temperatury, więc parametrem niezależnym może być albo temperatura, albo ciśnienie.

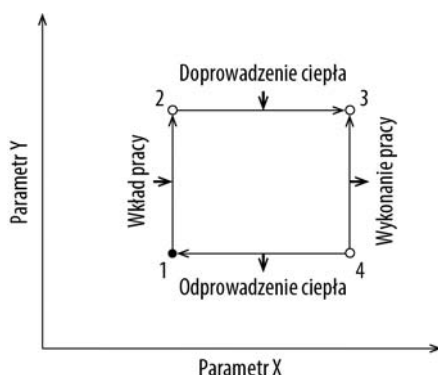
Jedną z konsekwencji postulatu stanu jest fakt, że jeśli znamy dwa niezależne parametry, które opisują stan substancji, to możliwe jest ustalenie wszystkich innych parametrów termodynamicznych (takich jak energia wewnętrzna, entalpia i entropia) tej substancji.

We wcześniejszych podrozdziałach dotyczących energii wewnętrznej i entalpii znajdują się na przykład równania umożliwiające określenie tych wartości energii na podstawie temperatury. W rozdziale 3. prezentuję prawo gazu doskonałego, określające, w jaki sposób są ze sobą powiązane temperatura, ciśnienie i objętość gazu. Z rozdziału 8. dowiesz się natomiast, jaka jest zależność pomiędzy temperaturą i ciśnieniem a entropią.

Łączenie procesów w celu stworzenia cyklu

W każdym cyklu termodynamicznym płyn przechodzi kilka różnych procesów i powraca do stanu początkowego na końcu cyklu. Cykl termodynamiczny wykorzystuje procesy, które albo wiążą się z pracą, albo przenoszą ciepło. Rysunek 2.3 przedstawia cykl o czterech typowych procesach.

- ✓ Wkład pracy.
- ✓ Doprowadzenie ciepła.
- ✓ Wykonanie pracy.
- ✓ Odprowadzenie ciepła.



Rysunek 2.3.
Cykl termodynamiczny łączy kilka procesów, tworząc pętlę

Procesy w cyklu termodynamicznym łączą się ze sobą na początku i na końcu. Oznacza to, że stan końcowy danego procesu jest stanem początkowym kolejnego. W typowej analizie termodynamicznej cyklu należy ustalić stan układu na końcu każdego procesu w ramach cyklu.

Niepełne cykle to marnowanie energii

Wczesne silniki parowe były straszliwie nieefektywne. Woda była w nich podgrzewana za pomocą ognia i tworzyła się para. Parę doprowadzano do tłoka, a następnie była ona odprowadzana do atmosfery. W tych wczesnych silnikach woda nie przechodziła pełnego cyklu termodynamicznego, bo nie wracała z powrotem do podgrzewacza, więc nie mo-

gła cyrkulować w silniku stale. James Watt poprawił efektywność silnika parowego, dodając kondensator montowany za tłokiem, woda mogła więc wracać do kotła i zakończyć cykl. W kotle woda wracała do stanu początkowego, realizując wcześniej szereg procesów termodynamicznych.

Przyjrzyjmy się na przykład nowoczesnemu silnikowi parowemu, w którym woda, realizując cykl doskonały, przechodzi następujące procesy termodynamiczne:

1. **Proces sprężania, wykorzystując wkład pracy, zwiększa ciśnienie wody.**
2. **Proces doprowadzenia ciepła przekształca wodę z postaci ciekłej w parę.**
3. **Proces rozprężania porusza tłok lub turbinę, odbierając pracę od silnika.**
4. **Proces skraplania odprowadza ciepło z układu i przywraca parę do stanu ciekłego.**

Po zakończeniu czwartego etapu woda jest gotowa do kolejnego cyklu.

Analizy termodynamiczne różnych cykli w silnikach i urządzeniach chłodniczych przedstawiam w rozdziałach 10. – 13.

Prawa natury dotyczące temperatury, energii i entropii

Do analizy układów termodynamicznych niezbędne są trzy podstawowe elementy: parametry substancji, procesy zmiany stanu substancji i zasady określające, w jaki sposób te parametry i procesy mają funkcjonować. W tym podrozdziale prezentuję cztery zasady termodynamiki. Dwie z nich odnoszą się wyłącznie do koncepcji temperatury i nie są tak naprawdę wykorzystywane do prowadzenia analiz. Służą do definiowania równowagi cieplnej i stanowią podstawę koncepcji bezwzględnej skali temperatury. Zasady, które będziemy wykorzystywali, najczęściej znane są jako pierwsza i druga zasada termodynamiki. Zasady te są stosowane do analizy przepływu energii (pierwsza zasada) i wzrostu entropii (druga zasada) w ramach procesu lub cyklu.

Zasada zerowa dotycząca temperatury

Po ciężkim dniu w pracy wracasz z biura do domu, zdejmujesz buty i układasz zmęczone nogi na swojej pięknej skórzanej sofie. Skóra jest chłodna dla stóp i Cię odświeża. Po pewnym czasie skóra pod Twoimi stopami nagrzewa się i przestaje dawać wrażenie orzeźwienia. Twoje stopy i skóra sofy osiągnęły *równowagę cieplną*; Ty i skóra macie już taką samą temperaturę.

Ciepło może być przenoszone z jednego obiektu do drugiego tylko wtedy, gdy pomiędzy nimi istnieje różnica temperatur. Pozostała część sofy jest w równowadze cieplnej z wnętrzem pokoju, więc nie zachodzi pomiędzy nimi wymiana ciepła. Gdybyś zrobił zdjęcie sofy aparatem termowizyjnym, zobaczyłbyś, gdzie znajdowały się na niej Twoje nogi i stopy.

Gdy dwa obiekty mają taką samą temperaturę, nie przenoszą ciepła. To treść zerowej zasady termodynamiki. Zasada ta głosi, że jeśli dwa ciała znajdują się niezależnie od siebie w stanie równowagi cieplnej z trzecim ciałem, to znajdują się także w stanie równowagi cieplnej ze sobą. To oczywistość, tak jak można by było powiedzieć, że jeżeli dwaj chłopcy wyglądają jak trzeci, to prawdopodobnie mamy do czynienia z trojaczkami. Konsekwencją zerowej zasady jest możliwość stosowania termometru do pomiaru temperatury. Termometr jest tutaj tak zwanym trzecim ciałem.



Pierwsza zasada dotycząca zachowania energii

Słyszac określenie *zachowanie energii*, mógłbyś być może pomyśleć o wyłączeniu latem klimatyzatora w domu czy też jeżdżeniu do sklepu na rowerze zamiast samochodem. W dziedzinie termodynamiki zachowanie energii oznacza coś zupełnie innego.

Pierwsza zasada termodynamiki stwierdza, że energii nie można stworzyć ani zniszczyć; może ona wyłącznie zmieniać formę. Termodynamiki uczymy się zasadniczo po to, aby zrozumieć, w jaki sposób energia zmienia formę — jak można wykorzystywać ciepło do wykonywania pracy i pracę do przenoszenia ciepła z jednego miejsca do innego.

Posługując się pierwszą zasadą do analizy układu, należy określić, jak w tym układzie zmienia się energia. To określenie znane jest jako **bilans energetyczny** układu. Śledzenie zmian energii w układzie jest jak przyglądanie się stanowi konta bankowego. Gdy otrzymujesz wypłatę, saldo na rachunku rośnie; tak jak w sytuacji, gdy energia jest dostarczana do układu. Wydając pieniądze z konta, sprawiasz, że saldo się zmniejsza. W układzie termodynamicznym energia jest wydatkowana, aby robić różne rzeczy, na przykład wykonywać pracę.

Zasada zachowania energii stwierdza, że kiedy energia trafia do układu, to musi albo w jakiś sposób go opuścić, albo zmienić jego energię. Energia może trafić do układu i go opuścić na jeden z trzech sposobów:

- ✓ **W formie pracy.** Gdy na przykład sprężamy powietrze za pomocą pompki, aby napompować oponę rowerową, wykonujemy pracę. Nasze mięśnie dostarczają energię niezbędną do wykonania pracy polegającej na sprężaniu powietrza.
- ✓ **W formie ciepła.** Gdy uruchamiamy samochód, paliwo spalające się w silniku uwalnia ciepło do powietrza wewnątrz cylindrów, umożliwiając silnikowi pracę.
- ✓ **W postaci wprowadzania lub usuwania masy z układu, bo każda masa posiada energię.** Po odkręceniu kranu z ciepłą wodą wypływa ona z podgrzewacza i zostaje zastąpiona wodą zimną. Energia zostaje usunięta z podgrzewacza za sprawą wprowadzanej do układu masy wody o niższej energii.

Bilans energetyczny można zapisać za pomocą jednego z poniższych równań:

$$[\text{Całkowita energia doprowadzana do układu}] - [\text{Całkowita energia opuszczająca układ}] = [\text{Zmiana całkowitej energii układu}]$$

$$E_{\text{we}} - E_{\text{wy}} = \Delta E_{\text{ukł}}$$

$$E_{\text{we}} - E_{\text{wy}} = (Q_{\text{we}} - Q_{\text{wy}}) + (W_{\text{we}} - W_{\text{wy}}) + (E_{\text{masy, we}} - E_{\text{masy, wy}}) = \Delta E_{\text{ukł}}$$

Te trzy równania wyrażają *bilans energetyczny* układu. Ostatnie z nich to ogólna postać tego równania. Równanie bilansu energetycznego ma zastosowania zarówno do procesów, jak i cykli. Zapisując równanie bilansu energetycznego określonego procesu, stosuje się zwykle wyrażenie oznaczające doprowadzenie energii lub jej wyprowadzenie. Dlatego też ilość energii wprowadzanej do procesu lub wyprowadzanej z niego jest równa zmianie energii układu w tym procesie. W zapisie matematycznym wygląda to następująco:

$$\Delta E_{\text{procesu}} = E_{\text{końcowa}} - E_{\text{początkowa}} = E_2 - E_1$$





Cykl termodynamiczny zawsze wraca do stanu początkowego, więc w równaniu jego bilansu energetycznego wartości masy i zmiany energii są równe 0. Możemy wobec tego uprościć ogólne równanie bilansu energetycznego do postaci, z której wynika, że transfer ciepła netto w cyklu jest równy pracy netto uzyskiwanej z tego cyklu.

$$(Q_{we} - Q_{wy}) = (W_{we} - W_{wy})$$

Dru ga zasada dotycząca entropii

Jeżeli chcesz podgrzać sobie na obiad miskę rosółu, nie stawiasz jej po prostu na stole i nie oczekujesz, że rosół ugotuje się sam. Chociaż stół ma parę kilodżuli energii, bo posiada określoną masę i temperaturę, to jednak jakość tej energii nie jest wystarczająca, aby ugotować rosół. Jakość energii stołu, pokoju i miski z zupą są takie same, więc nie może między nimi dojść do wymiany energii. Jeżeli pozostawisz miskę z gorącym rosółem na stole, to ostygnie. Energia przepływa w określonym kierunku, podobnie jak woda w naturalny sposób spływa w dół. W celu ogrzania czegoś konieczne jest posiadanie źródła wysokiej jakości energii dla układu, który ma ją otrzymać. Źródło ciepła musi mieć wyższą temperaturę niż substancja, która to ciepło odbiera.



Inaczej niż w przypadku trzech pozostałych zasad druga zasada termodynamiki nie jest jednym, prostym stwierdzeniem. Ma ona postać szeregu koncepcji dotyczących zdolności energii do przeprowadzenia określonych procesów. Jej podstawowe założenie polega na tym, że w typowym procesie termodynamicznym wiążącym się z doprowadzaniem ciepła energia wprowadzana jest *do* układu *ze* zbiornika energii o wysokiej zdolności do wykonania pracy (wysokiej temperaturze). W typowym procesie odprowadzania ciepła jest odwrotnie, energia jest oddawana w wyniku procesu *z* układu *do* zbiornika, w którym zdolność energii do wykonania pracy będzie niższa (niska temperatura). Wszystkie cykle termodynamiczne, których efektem jest praca lub chłodzenie, funkcjonują pomiędzy zbiornikami o wysokiej i niskiej temperaturze. Zbiornik o wysokiej temperaturze nazywamy **źródłem ciepła**, a zbiornik o temperaturze niskiej to **radiator**.

Analizując układ z punktu widzenia drugiej zasady termodynamiki, oceniamy zdolność energii wykorzystywanej w procesie do wykonania pracy oraz to, na ile zdolność ta obniża się w trakcie procesu. Oceniając zdolność energii do wykonania pracy, określamy wartość entropii wytworzonej w tym procesie. Procesy, które generują duże ilości entropii, są nieefektywne. Analiza z punktu widzenia drugiej zasady termodynamiki umożliwia ustalenie, na jakich etapach cykli termodynamicznych poprawa efektywności jest najbardziej korzystna.

Dru ga zasada termodynamiki stanowi podstawę określenia maksymalnego teoretycznego limitu efektywności cyklu. Żaden rzeczywisty układ nie może osiągnąć teoretycznego limitu efektywności ze względu na skutki przepływu ciepła za sprawą różnicy temperatur oraz tarcia. Oba te rzeczywiste zachowania generują entropię. Dwa różne ujęcia drugiej zasady termodynamiki — w odniesieniu do silników cieplnych wytwarzających pracę i cykli chłodniczych przenoszących ciepło — omawiam w rozdziale 7.

Trzecia zasada dotycząca zera bezwzględnego

Być może znasz powiedzenie „powoli jak melasa w styczniu”. Oznacza ono, że melasa, która jest całkiem gęsta nawet w temperaturze pokojowej, staje się bardzo gęsta, gdy robi się zimno. Cząsteczki melasy w niskiej temperaturze poruszają się znacznie wolniej niż w wysokiej.

Gdy atomy i cząsteczki substancji (takiej jak melasa) wibrują, oznacza to, że dysponują energią. Nawet melasa w styczniu dysponuje energią. Gdy temperatura substancji się obniża, ruchy cząsteczek także stają się coraz wolniejsze. Gdyby możliwe było doprowadzenie substancji do temperatury zera bezwzględnego, wszelkie ruchy cząsteczkowe by zamarły i mielibyśmy substancję doskonale uporządkowaną. Osiągnięcie zera bezwzględnego jest teoretycznie niemożliwe, bo zgodnie z drugą zasadą termodynamiki: aby sprowadzić proces do zera bezwzględnego, zbiornik o niskiej temperaturze musiałby mieć temperaturę nieco od niego niższą.

Gdy czysta krystalicznie substancja jest doskonale uporządkowana, można stwierdzić, że entropia tej substancji wynosi zero. Energia substancji w tych warunkach także wynosi zero. Koncepcja zerowej entropii w zerowej temperaturze stanowi istotę **trzeciej zasady termodynamiki**, która służy jako bezwzględny punkt odniesienia przy określaniu poziomu entropii substancji.

Skorowidz

A

adiabaticzna temperatura płomienia, 314, 315
analiza
 chłodziarek, 117
 cyklu Braytona, 178
 cyklu Diesla, 214
 cyklu Otta, 203
 cyklu silnika odrzutowego, 196
 cyklu za pomocą tablic, 252
 dyfuzora, 107
 idealnego silnika cieplnego, 172
 mieszaniny gazów, 274
 odwrotnego cyklu Braytona, 245
 pompy ciepła, 258
 procesów izentropowych, 143
 procesu niestacjonarnego, 115
 silników cieplnych, 117
 sprężarki, 108
 układów, 149
 układu zamkniętego spalania, 312

B

badanie form energii, 26
bilans energetyczny, 48, 114
 silnika, 104
 sprężarki, 108
bilansowanie
 dostępności układu, 160
 energii, 86
 entropii, 147
 masy i energii, 102
Brayton George, 321
bufor ciepła, 119

C

Carnot Nicolas Léonard Sadi, 322
Celsius Anders, 322
charakterystyki
 chłodziarek, 124
 silników cieplnych, 121
chłodzenie, 29, 76, 79, 124, 242, 249, 294
 międzystopniowe, 188, 190
chłodziarka, 117, 124
 sprężarkowa, 249, 250
ciała stałe, 139
ciąg, 194
ciecz, 139
 nasycona, 57, 58
 przechłodzona, 54
 sprężona, 54, 57
ciepło, 29, 67, 169
 odpadowe, 123
 utajone parowania, 40
 utajone sublimacji, 40
 utajone topnienia, 40
 właściwe, 41, 142, 143
 właściwe przy stałej objętości, 42
 właściwe przy stałym ciśnieniu, 42
ciężar właściwy, 37
ciśnienie, 32, 33, 52, 270
 nasylenia, 57
 pseudokrytyczne, 282
 średnie, 213
 względne, 145
 zredukowane, 266
cykl, 46
 Carnota, 171
 absorpcji, 330
 Atkinsona, 328
 Braytona, 171, 175, 178, 184, 242, 243
 Braytona zmodyfikowany, 186

cykl

- Carnota, 172
- chłodniczy, 29
- chłodniczy sprężania, 251
- Diesla, 199, 212, 214, 219
- Einsteina, 330
- Ericssona, 328
- gazowo-parowy, 123
- Millera, 329
- Otta, 199, 203, 209
- Rankine'a, 221, 223, 227, 233, 238
- silnika odrzutowego, 196
- Stirlinga, 327

cykle

- binarne, 332
- chłodnicze, 241
- niepełne, 46

czynnik chłodniczy, 250

D

definiowanie zbiorników energii cieplnej, 119

Diesel Rudolf, 322

doprowadzenie ciepła, 29

dostępność, 120, 150

druga zasada termodynamiki, 49, 117, 121, 149

- obliczanie wydajności układu, 165

dyfuzor, 105

dysza, 105

działanie idealnego cyklu turbodoładowego, 194

E

egzergia, 120, 150

energia, 26, 28, 37, 47

- całkowita, 37, 40

- chemiczna, 40

- jawna, 39

- jądrowa, 40

- kinetyczna, 27, 38

- makroskopowa, 37

- mikroskopowa, 38

- potencjalna, 27, 39

- utajona, 40

- wewnętrzna, 28, 38, 39

entalpia, 41

- parowania, 58, 304

- powietrza wilgotnego, 290

- produktów, 311

spalania, 305, 306

tworzenia związku, 304

entropia, 42, 47, 49, 129

F

Fahrenheit Daniel Gabriel, 322

faza, 51

formy energii, 26

G

gaz, 65

- doskonały, 64, 88, 140

- obojętny, 273

- przegrzany, 60

- rzeczywisty, 29, 64, 263, 264

generator pary, 222

- nadkrytyczny, 224

- podkrytyczny, 224

gęstość, 36

- względna, 36

granica, 43

I

idealny cykl turbodoładowy, 194

interpolacja, 62

- dwuliniowa, 63

- liniowa, 61

izentropowe

- rozprężanie, 177

- wykonanie pracy, 173

izentropowy wkład pracy, 173

izobaryczne

- doprowadzenie ciepła, 177

- oddawanie ciepła, 244, 251, 257

- odprowadzenie ciepła, 177

izobaryczny dopływ ciepła, 244, 252, 258

izotermiczne

- doprowadzenie ciepła, 173

- odprowadzenie ciepła, 173

J

jakość, 59, 120

jednostka ciśnienia, 52

Joule James Prescott, 323

K

kaloria, 39
klimatyzacja, 292
kocioł, 77
konwersja wilgotności względnej i właściwej, 286
kopała cieczy-pary, 223, 264

L

linia
cieczy nasyconej, 54
parowania, 53
pary nasyconej, 54

Ł

łączenie procesów, 46

M

masa, 33
cząsteczkowa, 65
kontrolna, 100
masowe natężenie przepływu, 100
metoda
stałego ciepła właściwego, 178, 203, 214
zmiennego ciepła właściwego, 181, 203, 206
mieszanina
powietrza i pary wodnej, 284
gazów, 294, 276
gazów obojętnych, 273
mieszanki termodynamiczne, 261
moc napędowa, 194
modyfikacja cyklu Rankine'a, 233
molowa mieszanina gazów, 274

N

nadmiar powietrza, 301
napęd odrzutowy, 193
natężenie przepływu
masowe, 100
objętościowe, 100
nawilżanie powietrza, 292
nieodwracalność, 163
chłodziarki, 247
chłodziarki sprężarkowej, 255
cyklu Braytona, 184

cyklu Diesla, 220
cyklu Otta, 210
cyklu Rankine'a, 228
pompy ciepła, 259

O

objętościowe natężenie przepływu, 100
objętość
kontrolna, 100
pseudoredukowana, 269
właściwa, 36
względna, 145
obliczanie
adiabaticznej temperatury płomienia, 315
dostępności, 152, 155, 156, 158
energii całkowitej, 40
nieodwracalności dla chłodziarki, 247, 255
nieodwracalności cyklu Braytona, 184
nieodwracalności cyklu Diesla, 220
nieodwracalności cyklu Otta, 210
nieodwracalności cyklu Rankine'a, 228
nieodwracalności pompy ciepła, 259
poziomu dostępności, 151
sprawności cyklu Carnota, 174
sprawności cyklu Diesla, 219
sprawności cyklu Otta, 209
sprawności cyklu Rankine'a, 227
wilgotności właściwej, 285
współczynnika ściśliwości, 282
współczynnika wydajności, 247
współczynnika wydajności chłodziarki
sprężarkowej, 254
współczynnika wydajności pompy ciepła, 258
wydajności układu, 165
zmiany entropii, 136
obniżanie temperatury, 241
obracanie wału, 70
odprowadzanie ciepła, 29
odwracalny proces adiabaticzny, 74, 95
odwrotny cykl Braytona, 242, 243
ogrzewanie, 76, 292, 293
ciała stałych, 41
cieczy, 41
gazów, 42
określanie
jakości, 59
jakości energii, 152
parametrów mieszaniny gazów, 276

określanie

- pracy objętościowej, 75
- sprawności cieplnej, 123
- sprawności cyklu Braytona, 184
- współczynnika wydajności, 126
- zmiany poziomu dostępności, 151

osuszanie, 295

- powietrza, 294

oszczędzanie energii, 30

otoczenie, 43

Otto Nikolaus August, 323

P

para

- nasycona, 58
- przegrzana, 60

parametry

- buforu ciepła, 119
- cieczy-pary wody nasyconej, 335, 336
- ekstensywne, 33
- gazów z procesu spalania, 340
- intensywne, 33
- mieszaniny gazów, 274, 276
- nasyconego czynnika R-134a, 338
- powietrza, 333
- przegrzanego czynnika R-134a, 339
- przegrzanej pary, 337
- punktu krytycznego, 265, 342
- sprężonej wody, 334
- stanu, 32
- substancji, 51
- termodynamiczne różnych materiałów, 341
- właściwe, 33

parownik, 80, 250

perpetuum mobile, 126

pierwsza zasada termodynamiki, 48

- ciała stałe, 96
- ciecze, 96
- gaz doskonały, 88
- układ otwarty, 99, 105
- układ spalania, 309
- zamknięty układ spalania, 312

plyn nadkrytyczny, 53, 223, 264

podgrzewacz wody, 156

- otwarty, 233
- zamknięty, 233

podgrzewanie, 77

pojemność

- cieplna właściwa, 32
 - skokowa silnika, 202
- pomiar potencjału pracy, 150
- pomiar, 32
- pompa, 107, 222
- ciepła, 125, 256, 258
- postulat stanu, 45
- powietrze suche, 284
- praca, 28, 67, 68
- na otoczenie, 161
 - objętościowa, 73, 75
 - odwracalna, 163
 - przepływu, 102

prawa natury, 47

prawo

- Amagata, 278, 279
- Daltona, 278, 281
- gazu doskonałego, 264, 266

proces

- adiabatyczny, 94
- izentropowy, 132, 143
- niestacjonarny, 114, 115
- o stałej objętości, 75
- o stałej temperaturze, 74, 92
- o stałym ciśnieniu, 74, 90
- politropowy, 75
- transferu ciepła, 161
- w stanie ustalonym, 103

procesy

- cyklu chłodniczego, 250
- cyklu Diesla, 212
- cyklu Rankine'a, 223, 224
- przebiegające w pompie ciepła, 256
- przejściowe, 113
- spalania, 299
- w chłodziarce sprężarkowej, 250
- termodynamiczne, 43

przebieg

- przemian fazowych, 56
- rzeczywistego cyklu Rankine'a, 237

przegrzew wtórny, 188, 190, 229

przemiany fazowe, 56

przepływ

- energii w wymiennikach ciepła, 109
- masy, 162
- niestacjonarny, 158
- stacjonarny, 155, 309, 310

przestrzeń p-V-T, 52

przyspieszanie, 71
 pseudozredukowana objętość właściwa, 269
 psychrometr obrotowy, 284
 psychrometria, 284
 pułapka, 234
 punkt
 krytyczny, 53
 potrójny, 53
 rosy, 287

R

radiator, 49, 119
 Rankine William, 323
 reakcja
 spalania, 29, 300
 stechiometryczna, 301
 regeneracja, 186, 233
 reguła Kaya, 278, 282
 rozprężanie, 151
 izentalpowe, 252, 257
 izentropowe, 244
 równania reakcji spalania, 300
 równanie
 gazu doskonałego, 85, 88
 stanu, 263
 stanu gazu doskonałego, 64
 van der Waalsa, 263, 270
 ruch tłoków, 72

S

schemat
 cyklu absorpcji, 330
 cyklu binarnego, 332
 cyklu Einsteina, 331
 połączonego cyklu Braytona/Rankine'a, 331
 procesu chłodzenia, 295
 silnika dwusuwowego, 326
 silnika Wankla, 327
 schładzanie, 80
 sformułowanie
 Clausiusa, 124
 Kelvina-Plancka, 121
 silnik
 Braytona, 187
 cieplny, 28, 117, 121, 122, 163
 dwusuwowy, 325
 o układzie gazowo-parowym, 331

o zapłonie sprężeniowym, 212
 odrzutowy, 101, 194
 tłokowy, 199
 Wankla, 326
 z turbiną gazową, 175
 z zapłonem iskrowym, 203
 skala
 Celsjusza, 35
 Fahrenheita, 35
 Kelvina, 35
 Rankine'a, 35
 skraplacz, 79, 222, 250
 spalanie, 29, 299, 310, 313
 nadmiar powietrza, 301
 parametry termodynamiczne, 303
 sprawność
 cieplna, 123, 163
 cyklu Braytona, 184
 cyklu Diesla, 219
 cyklu Otta, 209
 cyklu Rankine'a, 227
 napędowa, 194
 rzeczywistego cyklu Braytona, 192
 sprężanie
 izentropowe, 176, 243, 251, 257
 pary, 250
 sprężarka, 107, 108
 sprężyna, 69, 70
 stała
 gazowa, 65
 objętość, 89
 objętość właściwa, 290
 temperatura, 92
 wartość ciepła właściwego, 245
 stałe
 ciepło właściwe, 143
 ciśnienie, 90
 stan, 43
 martwy, 150
 ustalony, 103
 stochiometryczne równania reakcji, 301
 stopień sprężania, 202
 stosowanie pierwszej zasady, 85
 stosunek
 ciepł właściwych, 42
 ciśnień, 245
 strefa reakcji, 315
 sublimacja, 52
 substancje czyste, 136

Ś

ścieżka

- adiabatyczna, 44
- izentalpowa, 44
- izentropowa, 44
- izobaryczna, 44
- izochoryczna, 44
- izotermiczna, 44
- odwracalna, 44
- procesu, 44

ściśliwość, 263, 266

- mieszanin gazów rzeczywistych, 277

średnie ciśnienie użyteczne, 213

T

tablice, 61

- parametrów pary, 225
- parametrów termodynamicznych czynnika chłodniczego, 252

temperatura, 32, 34, 47, 288

- nasycenia, 57, 222
- pseudokrytyczna, 282
- termometru mokrego, 290
- termometru suchego, 284, 289
- termometru wilgotnego, 284
- zredukowana, 266

termodynamika, 25

Thomson William, 324

tłok, 72

transfer dostępności, 161, 162

trzecia zasada termodynamiki, 50

turbina, 107, 222

- idealna, 144

tworzenie

- cyklu, 46
- ścieżki procesu, 44

U

układ, 43

- jednostek

- SI, 32

- USCS, 32

- o stałej objętości, 89

- otwarty

- obliczanie dostępności, 155, 158
 - zachowanie masy, 99

- z pompą ciepła, 257

- zamknięty, 85

- bilansowanie energii, 86

- obliczanie poziomu dostępności, 151

- zachowanie masy, 85

ułamek masowy, 274

uogólniony wykres stopnia ściśliwości, 263

usprawnianie cyklu Rankine'a, 229

ustalanie

- ciśnienia, 270

- współczynników ściśliwości, 279, 281

utajone ciepło parowania, 58

W

wał, 70

wartość opałowa, 307

Watt James, 324

wielkości

- pochodne, 32

- podstawowe, 32

wilgotność, 288

- właściwa, 285, 290

- względna, 285, 290

woda zasilająca, 78

współczynnik

- nadmiaru powietrza, 307

- sprężystości, 69

- ściśliwości, 266, 277, 279, 281, 282

- ściśliwości mieszanin, 278

- wydajności, 126

- wydajności chłodziarki sprężarkowej, 254

- wydajności odwrotnego cyklu Braytona, 247

- wydajności pompy ciepła, 258

wykonanie pracy, 29

wykres

- fazowy, 53

- p-V, 55, 93, 200, 214

- p-V cyklu Atkinsona, 329

- p-V cyklu Ericssona, 328

- p-V cyklu Millera, 329

- p-V cyklu Stirlinga, 327

- psychrometryczny, 289, 291, 293

- ściśliwości, 267

- T-h, 63

- T-s, 134, 138, 142, 195

- T-V, 53–56

wymiennik ciepła, 77, 109

Z

zachowanie
 energii, 48
 masy, 85, 99
zależność
 T-ds, 135
 wilgotności i ciśnienia, 285
zamknięty układ spalania, 312
zapis bilansu energetycznego, 87
zapłon sprężeniowy, 212
zasada
 spadku dostępności, 162
 wzrostu entropii, 132
 zachowania energii, 85, 87
 zachowania masy, 85, 100
 zerowa, 47
zawór dławiący, 111, 252

zbiornik
 energii cieplnej, 119
 niskotemperaturowy, 242
 wysokotemperaturowy, 242
zero bezwzględne, 50
zmiana poziomu dostępności, 151
zredukowana temperatura i ciśnienie, 268
zwiększanie sprawności cyklu Braytona, 186

Ż

źródło ciepła, 49, 119

PROGRAM PARTNERSKI

GRUPY WYDAWNICZEJ HELION



1. ZAREJESTRUJ SIĘ
2. PREZENTUJ KSIĄŻKI
3. ZBIERAJ PROWIZJĘ

Zmień swoją stronę WWW
w działający bankomat!

Dowiedz się więcej i dołącz już dzisiaj!

<http://program-partnerski.helion.pl>

GRUPA WYDAWNICZA



Helion SA

Termodynamika nie jest aż tak skomplikowana

Sama myśl o termodynamice sprawia, że zaczynasz się pocić? Niepotrzebnie! Dzięki temu praktycznemu przewodnikowi zabłyśniesz na zajęciach za sprawą łatwych do zrozumienia i opisanych przystępnym językiem wyjaśnień sposobów wykorzystywania energii w takich urządzeniach jak samochody, samoloty, klimatyzatory i elektronika.

- **Podstawy termodynamiki** — *przyjrzyj się przykładom zarówno naturalnych, jak i stworzonych przez człowieka układów termodynamicznych i poznaj zasady wykorzystywania energii do wykonywania pracy.*
- **Podkreśl ogrzewanie** — *dowiedz się, w jaki sposób należy wykorzystywać pierwszą i drugą zasadę termodynamiki do określania efektywności różnorodnych urządzeń (i jej poprawiania).*
- **Zachowuj się!** — *poznaj zasady zachowania i wzajemne oddziaływania gazów doskonałych i rzeczywistych w różnych sytuacjach.*
- **Zapłoń z pożądania** — *dowiedz się wszystkiego o zachowaniu masy i energii w procesach spalania.*

Dr Michael Pauken jest głównym inżynierem mechanikiem w Laboratorium Napędu Odrzutowego NASA, wydziale Kalifornijskiego Instytutu Technologicznego, gdzie prowadzi także zajęcia z zakresu termodynamiki i transferu ciepła.



W tej książce znajdziesz:

- **zasady termodynamiki**
- **istotne parametry i ich relacje**
- **informacje o substancjach stałych, ciekłych i gazach**
- **zasady współdziałania pracy i ciepła**
- **cykle zasilające procesy termodynamiczne**
- **związki i reakcje chemiczne**
- **pionierów termodynamiki**
- **rzeczywiste zastosowania zasad i koncepcji termodynamicznych**

PO ROZUM NA...

www.dlabystszakow.pl

Zamówienia telefoniczne:



0 801 339900



0 601 339900

septem
septem.pl

Sprawdź najnowsze promocje: <http://dlabystszakow.pl/promocje>
Książki najchętniej czytane: <http://dlabystszakow.pl/bestsellery>
Zamów informacje o nowościach: <http://dlabystszakow.pl/nowosci>

Helion SA: ul. Kościuszki 1c, 44-100 Gliwice, tel.: 32 230 98 63
e-mail: rad@dlabystszakow.pl <http://dlabystszakow.pl>

Cena 49,00 zł

ISBN 978-83-283-2753-5



9 788328 327535