

W prostocie tkwi siła

# Termodynamika

DLA

# BYSTRZAKÓW™

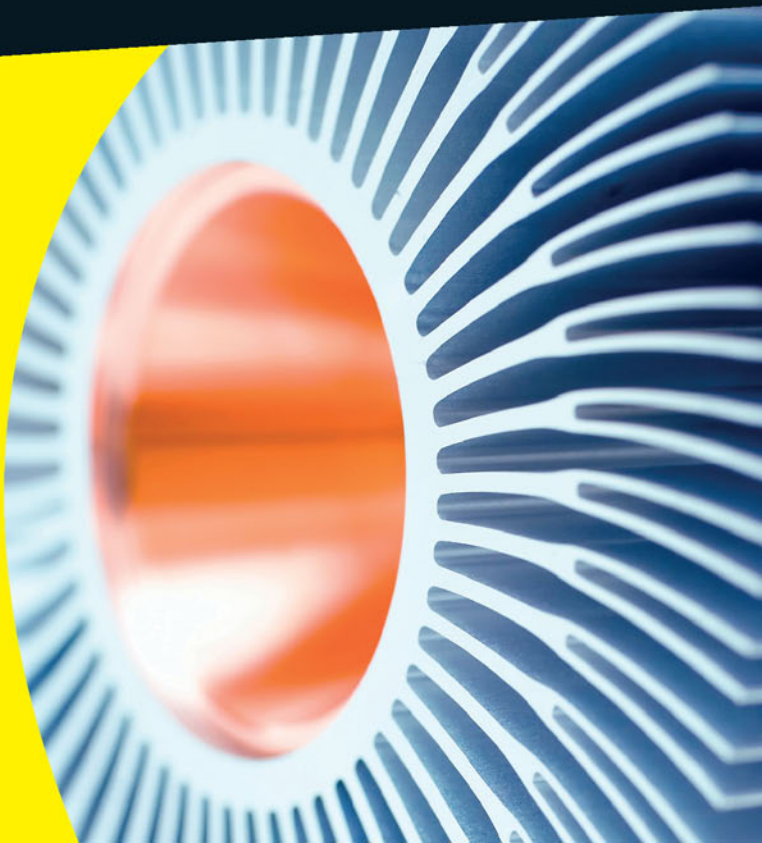
## Dowiedz się, jak:

- 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](mailto:dlabystrzakow@dlabystrzakow.pl)  
WWW: <http://dlabystrzakow.pl>

Printed in Poland.

- Kup książkę
- Poleć książkę
- Oceń książkę

- Księgarnia internetowa
- Lubię to! » Nasza społeczność

# Spis treści

---

<b>O autorze</b> .....	<b>13</b>
<b>Podziękowania od autora</b> .....	<b>15</b>
<b>Wstęp</b> .....	<b>17</b>
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

## ***Część I: Podstawy termodynamiki*** ..... **23**

<b>Rozdział 1: Termodynamika w codziennym życiu</b> .....	<b>25</b>
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

<b>Rozdział 2: Fundamenty termodynamiki .....</b>	<b>31</b>
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
<b>Rozdział 3: Praca z fazami i parametrami substancji .....</b>	<b>51</b>
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
<b>Rozdział 4: Praca i ciepło pasują do siebie jak dwie połówki jabłka .....</b>	<b>67</b>
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

## 8 Termodynamika dla bystrzaków ---

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 turboodrzutowego .....	194
Analiza cyklu silnika odrzutowego .....	196

<b>Rozdział 11: Praca z cyklami Otta i Diesla .....</b>	<b>199</b>
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
<b>Rozdział 12: Praca z cyklami Rankine’a .....</b>	<b>221</b>
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
<b>Rozdział 13: Obniżanie temperatury — cykle chłodnicze .....</b>	<b>241</b>
Podstawy cykli chłodniczych .....	242
Chłodzenie za pomocą odwrotnego cyklu Braytona .....	242
Badanie czterech procesów w odrotnym 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 termodynamiki ..... 321**

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 uwagi ..... 325**

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

**Dodatek ..... 333****Skorowidz ..... 343**

## 12 Termodynamika dla bystrzaków ---

## Rozdział 2

# Fundamenty termodynamiki

*W tym rozdziale:*

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

**K**ażdy 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 termoformu 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 termoform, a następnie po tym, jak rozgrzeje już łóżko. Masa wody w termoformie 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 termoform w łóżku. Oznacza to, że informuje nas on, w jaki sposób zachowuje się termoform, 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 posługują 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 ilością 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  $1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot m/s^2$ .

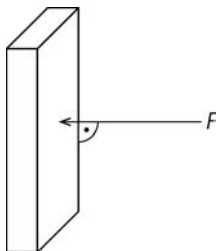
Gdy masa ( $m$ ) pojawia się jako zmienna w równaniu, oznaczam ją w tej książce kursywą. Gdy pojawia się jednostka oznaczona jako „m”, tak jak w powyższym równaniu, oznacza ona metry i nie jest zapisywana kursywą.



## 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 wydobyc 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 kelvina (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 błędów 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 ( $\rho$ ) określa się, dzieląc masę ( $m$ ) materiału przez objętość ( $V$ ), jaką ona zajmuje. W układzie SI jednostką gęstości jest kilogram na metr sześcienny ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ). 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 sześciennie na kilogram ( $\text{m}^3/\text{kg}$ ). 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:

$$\rho_{\text{wzgl.}} = \frac{\rho}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}}$$

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** ( $\gamma$ ) materiału. Możemy się z nim zetknąć na przykład przy określaniu energii potencjalnej słupa cieczy. Aby uzyskać wartość ciężaru właściwego, mnożymy gęstość materiału ( $\rho$ ) przez przyspieszenie ziemskie ( $g$ ):  $\gamma = \rho g$ . W układzie SI jednostką są niutony na metr sześcienny ( $\text{N/m}^3$ ).

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. Rzeka (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 *energję 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 energję makroskopową, gdy przesuwają 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 **energją 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. Poziomym 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 **energią 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.

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

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

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 sześciennie ( $\text{kPa}\cdot\text{m}^3$ ), 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 ( $\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$ ).



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  $U_2 - U_1 = 0,2 \text{ kg} \cdot 4,18 \text{ kJ}/\text{kg}\cdot\text{K} \cdot (100 - 22)^\circ\text{C} = 65,2 \text{ kJ}$ .

### 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 kilodżula 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** ( $\kappa$ ). 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.

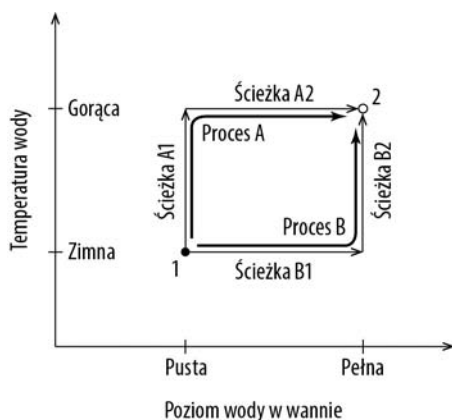
**Proces** termodynamiczny jest po prostu sposobem opisu przemian układu, który z danego stanu przechodzi w inny. **Układ** to zasób materiału, który badamy lub analizujemy w ramach problemu. **Stan** określa parametry materiału na początku i na końcu procesu. Każdy układ podlegający procesowi termodynamicznemu 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 różnych ścieżek do przygotowania kąpieli

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 umożliwiła 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.

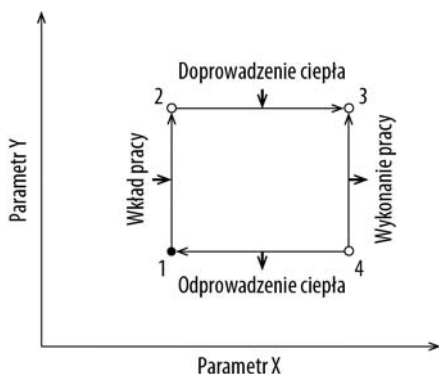
Jedną z konsekwencji postulatu stanu jest fakt, że jeśli znamy dwa niezależne parametry, które opisują stan substancji, to możliwe jest ustalenie wszystkich innych parametrów termodynamicznych (takich jak energia wewnętrzna, entalpia i entropia) tej substancji.

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 jeźdźeniu 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:

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

$$E_{we} - E_{wy} = \Delta E_{ukl}$$

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

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:

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



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.

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

## Druga 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 sphywa 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.

**Druga 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 ciepłych 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  
  mieszanki 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  
  nasyceń, 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 turboodrzutowego, 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 turboodrzutowy, 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  
 kopuła 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  
 mieszaniny 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  
 pseudozredukowana, 269  
 właściwa, 36  
 względna, 145  
 obliczanie  
 adiabatycznej 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 adiabatyczny, 74, 95  
 odwrotny cykl Braytona, 242, 243  
 ogrzewanie, 76, 292, 293  
 ciało 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
- mieszanki 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
- pomiary, 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

- adiabaticzny, 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 chłodzarce 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

przebieg 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  
   ciśnienia, 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>



# 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 elektronicznie.

- **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 wzajemnego oddziaływania gazów doskonałych i rzeczywistych w różnych sytuacjach.*
- **Zapłon 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, cieczech 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.dlabystrzakow.pl](http://www.dlabystrzakow.pl)

Zamówienia telefoniczne:

 0 801 339900  0 601 339900

**septem**  
septem.pl

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

Helion SA: ul. Kościuszki 1c, 44-100 Gliwice, tel.: 32 230 98 63  
e-mail: [rady@dlabystrzakow.pl](mailto:rady@dlabystrzakow.pl) <http://dlabystrzakow.pl>

**Cena 49,00 zł**

ISBN 978-83-283-2753-5



9 788328 327535