

Spis treści

Przedmowa do wydania I 10

Przedmowa do wydania II 11

Przedmowa do wydania III 12

Przedmowa do wydania IV 13

Wykaz ważniejszych oznaczeń 14

1. Wiadomości wstępne 17

1.1. Fenomenologiczny opis materii 17

1.2. Wielkości ekstensywne (WE) 19

1.3. Kryteria istnienia granicy pozornej 19

1.4. Gęstość zasobów wielkości substancjalnych (WS) oraz wielkości komponentalnych (WK) 21

1.5. Prędkość substancjalna i komponentalna 23

1.6. Wielkości intensywne (WI) 25

1.7. Pęd cieplny i energia kinetyczna zbioru cząsteczek substancji 25

1.8. Klasyfikacja energii 26

1.9. Wielkości referencjalne 27

1.10. Obszar substancjalny, niesubstancjalny oraz komponentalny 28

1.11. Zasady zapisu tensorów w symbolice kreskowej Gibbsa i wskaźnikowej Shoutena 30

1.12. Różniczka i pochodna referencjalna wielkości polowej 40

1.13. Pochodna substancjalna i komponentalna skalarnych i wektorowych wielkości polowych 43

1.14. Kryteria istnienia pól stacjonarnych i jednorodnych 44

1.15. Zastosowanie jakobianów w termodynamice 45

1.15.1. Analiza właściwości jakobianów 45

1.15.2. Tożsamości termodynamiczne 49

1.16. Określenie rzędu elementarnych przyrostów zasobu objętości i zasobu masy w układzie 51

2. Zerowa zasada termodynamiki 55

2.1. Parametry stanu i funkcje stanu 55

2.2. Układ, faza układu, równowaga i odwracalność termodynamiczna 55

2.3. Procesy kwazistatyczne w termodynamice 57

2.4. Osłona, adiabatyczna i diatermiczna	57
2.5. Temperatura układu	58
2.6. Ciśnienie w układzie	58
2.7. Sformułowanie zerowej zasady termodynamiki	62
3. Gazy doskonałe, półdoskonałe i rzeczywiste	63
3.1. Model gazu doskonałego	63
3.2. Termiczne współczynniki rozszerzalności i prężności oraz izotermiczny współczynnik ściśliwości	63
3.3. Prawo izobary Gay-Lussaca	64
3.4. Prawo izochory Charlesa	66
3.5. Prawo izotermy Boyle'a-Mariotte'a	67
3.6. Równanie stanu gazu doskonałego Clapeyrona. Indywidualna stała gazowa	68
3.7. Prawo Avogadra. Liczba Avogadra	70
3.8. Molowa gęstość zasobu objętości. Uniwersalna stała gazowa	70
3.9. Pojemność cieplna substancji	73
3.10. Gazy półdoskonałe	74
3.11. Gazy rzeczywiste	74
3.12. Prawo stanów odpowiadających sobie	77
3.13. Skala temperatury termometru gazowego	79
3.14. Równanie stanu gazu rzeczywistego van der Waalsa	81
3.15. Równanie stanu gazu rzeczywistego Berthelota	86
3.16. Równanie stanu gazu rzeczywistego Dieteriego	87
4. Termodynamika fazy gazowej wieloskładnikowej	89
4.1. Objętościowe gęstości zasobu ilości moli oraz masy mieszaniny	89
4.2. Objętościowe gęstości zasobu ilości moli oraz masy składnika mieszaniny	90
4.3. Koncentracja składnika mieszaniny	
4.4. Molowa koncentracja składnika mieszaniny	91
4.5. Prawo Daltona	93
4.6. Ciśnienie składnika mieszaniny	93
4.7. Ułamek molowy składnika mieszaniny	93
4.8. Ułamek masowy składnika mieszaniny	94

4.9. Parcjalna gęstość zasobu objętości	95
4.10. Masowa gęstość zasobu objętości składnika mieszaniny	99
4.11. Udział objętościowy składnika mieszaniny	100
4.12. Gęstość strumienia dyfuzji	101
4.13. Równanie ciągłości dyfuzji	103
5. Pierwsza zasada termodynamiki	106
5.1. Klasyfikacja transportu energii	106
5.2. Ciepło	107
5.3. Praca	107
5.3.1. Równanie Pfaffa	108
5.3.2. Praca bezwzględna objętościowa	110
5.3.3. Praca uogólniona	113
5.3.4. Praca uogólniona zewnętrzna	114
5.3.5. Praca uogólniona wewnętrzna	114
5.3.6. Praca tarcia	114
5.3.7. Praca elementarna	115
5.3.8. Praca techniczna	115
5.3.9. Masowe gęstości ilości pracy elementarnej, bezwzględnej objętościowej, uogólnionej i technicznej	116
5.3.10. Mechaniczny równoważnik ciepła i cieplny równoważnik pracy	118
5.4. Energia wewnętrzna	120
5.5. Aksjomat bilansowy dla wielkości ekstensywnych (WE)	121
5.6. Bilans podstawowy dla wielkości ekstensywnych (WE)	122
5.7. Substancjalny bilans zasobu energii wewnętrznej (EW) dla wielkości ekstensywnych (WE)	124
5.8. Sformułowanie pierwszej zasady termodynamiki dla wielkości ekstensywnych (WE)	129
5.9. Bilans energii wewnętrznej (EW) w punkcie substancjalnym	130
5.10. Sformułowanie równania pierwszej zasady termodynamiki dla wielkości intensywnych (WI)	139
5.11. Funkcje termodynamiczne entalpii oraz entalpii uogólnionej	140
5.12. Uogólniony bilans zasobu energii wewnętrznej dla układu otwartego	142
5.13. Sformułowanie równania pierwszej zasady termodynamiki dla układu otwartego	145
6. Druga zasada termodynamiki i jej konsekwencje	146

6.1. Przemiany nierównowagowe	146
6.2. Entropia. Sformułowanie drugiej zasady termodynamiki	147
6.3. Statystyczna interpretacja entropii	152
6.4. Uogólnione ciepło właściwe substancji	158
6.5. Równanie Gibbsa	160
6.6. Funkcja jednorodna. Tożsamość Eulera	162
6.7. Funkcja termodynamiczna entalpii swobodnej oraz uogólnionej entalpii swobodnej	163
6.8. Funkcja termodynamiczna energii swobodnej	166
6.9. Termodynamiczne kryteria równowagi	167
6.10. Uogólniony izobaryczno-izotermiczny potencjał termodynamiczny	171
6.11. Warunki równowagi w układzie izolowanym	175
6.12. Potencjał chemiczny. Potencjał elektrochemiczny	178
6.13. Równanie Gibbsa-Duhema	183
6.14. Uogólnione termodynamiczne równania Maxwella	183
6.15. Różnica między ciepłami właściwymi przy stałej sile i przy stałej współrzędnej uogólnionej. Równanie Meyera	186
6.16. Równania ciepła z uwzględnieniem drugiej zasady termodynamiki	188
6.17. Prawo Joule'a	189
6.18. Energia wewnętrzna układu substancjalnego oddziałującego z otoczeniem w przemianie izochorycznej	192
7. Podstawowe funkcje termodynamiczne gazów doskonałych i półdoskonałych	194
7.1. Energia wewnętrzna gazu doskonałego i półdoskonałego	194
7.2. Entalpia gazu doskonałego i półdoskonałego	195
7.3. Entropia gazu doskonałego i półdoskonałego	196
8. Przemiany termodynamiczne	199
8.1. Przemiana izochoryczna	199
8.2. Przemiana izobaryczna	201
8.3. Przemiana izotermiczna	203
8.4. Przemiana izentropowa (adiabata odwracalna)	205
8.5. Przemiana politropowa	207
8.6. Przemiany gazu doskonałego w układach otwartych	211
8.6.1. Napełnianie zbiornika	211

- 8.6.2. Opróżnianie zbiornika 214
- 8.6.3. Ogrzewanie gazu w zbiorniku otwartym 215
- 9. Analiza funkcji termodynamicznych gazów rzeczywistych 218
 - 9.1. Ciepło właściwe gazu rzeczywistego przy stałej objętości 218
 - 9.2. Ciepło właściwe gazu rzeczywistego przy stałym ciśnieniu 219
 - 9.3. Funkcja termodynamiczna energii wewnętrznej gazów rzeczywistych 221
 - 9.4. Funkcja termodynamiczna entalpii gazów rzeczywistych 222
 - 9.5. Funkcja termodynamiczna entropii gazów rzeczywistych 224
 - 9.6. Zjawisko Joule'a-Gay-Lussaca 225
 - 9.7. Zjawisko Joule'a-Thomsona 227
 - 9.8. Efekt zjawiska Joule'a-Thomsona 229
 - 9.9. Ciepło neutralizacji całkowitego efektu zjawiska Joule'a-Thomsona 234
 - 9.10. Skraplanie gazów 237
- 10. Para 242
 - 10.1. Proces izobarycznego parowania 242
 - 10.2. Ciepło przemiany fazowej parowania 245
 - 10.3. Ciepło przemiany fazowej sublimacji 247
 - 10.4. Równanie Clausiusa-Clapeyrona 248
 - 10.5. Stopień suchości pary mokrej 249
- 11. Gazy wilgotne. Powstawanie gazu wilgotnego 251
- 12. Obiegi termodynamiczne 255
 - 12.1. Model doskonałej tłokowej maszyny przepływowej 257
 - 12.2. Praca indykatorowa i wykresowa 258
 - 12.3. Praca wewnętrzna (internijna) 259
 - 12.4. Praca efektywna 259
 - 12.5. Lokalne równanie zasobu entalpii dla urządzeń przepływowych 260
 - 12.6. Praca odwracalnego obiegu prawo- i lewobieżnego 264
 - 12.7. Praca nieodwracalnego obiegu prawo- i lewobieżnego 265
 - 12.8. Bilanse zasobu entalpii dla nieodwracalnych obiegów prawo- i lewobieżnych o ustalonych strumieniach przepływu czynnika 266
 - 12.9. Sprawność termiczna obiegu prawobieżnego 270

- 12.10. Sprawność termiczna obiegu lewobieżnego 270
- 12.11. Odwracalny obieg Carnota 272
- 12.12. Teoremat Carnota 273
- 12.13. Termodynamiczna skala temperatury Kelvina 275
- 12.14. Obieg porównawczy Otta 277
- 12.15. Obieg porównawczy Diesla 279
- 12.16. Obieg porównawczy Sabathégo 280
- 12.17. Obieg porównawczy Joule'a 281
- 12.18. Sprawności i moce silników spalinowych 284
- 12.19. Sprężarki tłokowe 288
- 13. Przemiany fazowe 292
 - 13.1. Reguła faz Gibbsa 295
 - 13.2. Przemiany fazowe pierwszego i drugiego rodzaju 295
 - 13.3. Termodynamika przemian fazowych 299
- 14. Trzecia zasada termodynamiki 302
 - 14.1. Równanie Gibbsa-Helmholtza 302
 - 14.2. Całka równania Gibbsa-Helmholtza 304
 - 14.3. Teoremat Nernsta 305
 - 14.4. Sformułowanie trzeciej zasady termodynamiki 307
 - 14.5. Konsekwencje trzeciej zasady termodynamiki 308
- 15. Kinetyczna teoria gazów 309
 - 15.1. Kinetyczna teoria ciśnienia gazu 310
 - 15.2. Porównanie praw gazu doskonałego z wynikami kinetycznej teorii gazów 319
 - 15.3. Ekwipartycja energii 323
 - 15.4. Rozkład prędkości Maxwella 324
 - 15.4.1. Przestrzeń prędkości 324
 - 15.4.2. Zderzenia sprężyste cząsteczek 329
 - 15.4.3. Obliczenie stałych i funkcji objętościowej gęstości zasobu ilości cząsteczek gazu o zasobie energii 331
 - 15.4.4. Rozkład zasobu ilości cząsteczek w funkcji modułów ich prędkości 335
 - 15.5. Prędkość średnia i prędkość średniej kwadratów prędkości 339

- 15.6. Prędkość najbardziej prawdopodobna 340
- 15.7. Średnia droga swobodna 341
- 15.8. Prawdopodobieństwo przebycia drogi swobodnej przez cząsteczkę 344
- 15.9. Częstość zderzeń cząsteczek 345
- 15.10. Gęstość strumienia wymiany ilości cząsteczek gazu 346
- 15.11. Efuzja molekularna 348
- 15.12. Gęstość strumienia wymiany ilości cząsteczek pary 350
- 15.13. Współczynniki w zjawiskach transportu 351
- 16. Kinetyczna teoria promieniowania 359
 - 16.1. Pudło izotermiczne 359
 - 16.2. Zasób ilości oscylatorów promieniowania w pudle izotermicznym 359
 - 16.3. Objętościowa gęstość zasobu ilości oscylatorów promieniowania 361
 - 16.4. Funkcja rozkładu widmowego objętościowej gęstości zasobu ilości oscylatorów promieniowania 363
 - 16.5. Funkcja rozkładu widmowego objętościowej gęstości zasobu energii promieniowania w ujęciu klasycznym 364
 - 16.6. Funkcja rozkładu widmowego objętościowej gęstości zasobu energii promieniowania według Wiena 366
 - 16.7. Zasób energii promieniowania oscylatora w przedziale całego pola dozwolonych poziomów energetycznych (kwantowa hipoteza Plancka) 367
 - 16.8. Funkcja rozkładu widmowego objętościowej gęstości zasobu energii promieniowania w ujęciu Plancka 371
 - 16.9. Objętościowa gęstość zasobu energii promieniowania w ujęciu Plancka 373
 - 16.10. Funkcja rozkładu widmowego wektora gęstości strumienia wymiany energii promieniowania 374
 - 16.11. Wektor gęstości strumienia wymiany energii promieniowania. Prawo promieniowania Stefana-Boltzmann 376
 - 16.12. Prawo przesunięć Wiena 377
 - 16.13. Ciśnienie promieniowania 378
 - 16.14. Określenie objętościowej gęstości zasobu energii promieniowania przy wykorzystaniu pierwszej i drugiej zasady termodynamiki 379
 - 16.15. Adiabatyczne rozprężanie promieniowania 381
 - 16.16. Teoria Debye'a ciepła właściwego ciał stałych 382
 - 16.17. Elektronowe ciepło właściwe 385

- 16.18. Inwersja obsadzeń 385
- 16.19. Mechanika atomów i cząstek 390
- 16.20. Równanie falowe Schrödingera we współrzędnych prostokątnych 397
- 16.21. Wartości oczekiwane 407
- 16.22. Równanie falowe Schrödingera we współrzędnych sferycznych 411
- 16.23. Orbitalny moment pędu 417
- 16.24. Studnia potencjału o skończonej głębokości 424
- 16.25. Zjawisko tunelowe 429
- 16.26. Kwantowy oscylator harmoniczny 433
- 16.27. Energia translacyjna, rotacyjna i oscylacyjna cząsteczki 438
- 16.28. Energia zbioru cząsteczek w ujęciu molekularnym 447
- 16.29. Nierozróżnialność i statystyka kwantowa 460
- 16.30. Rozkłady statystyczne 468
 - 16.30.1. Rozkład mikrokanoniczny 470
 - 16.30.2. Rozkład kanoniczny 472
 - 16.30.3. Wielki rozkład kanoniczny 477
 - 16.30.4. Zespół statystyczny 481
 - 16.30.5. Hipoteza ergodyczna Boltzmann 482
- 16.31. Statystyki kwantowe Fermiego-Diraca oraz Bosego-Einsteina 484
- 16.32. Zastosowanie rozkładu Boltzmann do przybliżenia rozkładów kwantowych 489
- 16.33. Termodynamika lasera 491
- 16.34. Gaz fotonowy i fononowy 497
- 16.35. Kondensacja Bosego. Funkcja gęstości stanów 497
- 16.36. Ciekły hel 502
- 16.37. Gaz elektronów swobodnych 503
- 16.38. Emisja termoelektronowa równanie Richardsona 505
- 16.39. Potencjał kontaktowy 509
- 16.40. Termodynamika ośrodków dielektrycznych i magnetycznych 511
- 16.41. Zjawisko magnetokaloryczne w substancjach paramagnetycznych 526
- 17. Wymiana ciepła w procesie promieniowania 530
 - 17.1. Analiza promieniowania 530

17.1.1. Bilans zasobu energii promieniowania	530
17.1.2. Strumień emisji energii promieniowania	532
17.1.3. Wektor gęstości strumienia emisji energii promieniowania	532
17.1.4. Funkcja rozkładu widmowego wektora gęstości strumienia emisji energii promieniowania	532
17.1.5. Wektor gęstości strumienia ukierunkowanej emisji energii promieniowania (intensywność lub światłość promieniowania)	533
17.1.6. Funkcja rozkładu widmowego wektora gęstości strumienia ukierunkowanej emisji energii promieniowania (monochromatyczna intensywność lub monochromatyczna światłość promieniowania)	534
17.2. Synteza promieniowania	534
17.3. Emisyjność. Prawo Lamberta	536
17.4. Bilans zasobu energii promieniowania monochromatycznego dla ciał nieprzeźroczystych. Prawo Kirchhoffa	543
17.5. Wymiana ciepła pomiędzy promieniującymi powierzchniami	546
17.6. Promieniowanie substancji częściowo przeźroczystych	551
17.6.1. Bilans strumienia emisji energii promieniowania dla ośrodka częściowo przeźroczystego	551
17.6.2. Strumienie emisji oraz wymiany energii promieniowania	554
18. Wymiana ciepła w procesie przewodzenia	556
18.1. Równanie Fouriera-Kirchhoffa	556
18.2. Równanie przewodnictwa cieplnego	559
18.3. Warunki brzegowe dla wymiany ciepła z otoczeniem	563
18.4. Ciepło akumulacji i temperatura średnia	566
19. Wymiana ciepła przez unoszenie	575
19.1. Prawo Newtona przejmowania ciepła	575
19.2. Konwekcja wymuszona	577
19.3. Konwekcja swobodna	581
20. Złożona wymiana ciepła	585
21. Termodynamika stanów nierównowagowych	589
21.1. Referencjalny bilans objętościowej gęstości zasobu entropii	589
21.2. Klasyczne i lokalne ujęcie drugiej zasady termodynamiki	592
21.3. Źródło entropii	595
21.4. Termodynamika procesów nieodwracalnych	598

21.5. Liniowe równania fenomenologiczne	600
21.6. Efekty krzyżowe i zasada Curie	601
21.7. Źródło entropii jako kwadratowa funkcja bodźców termodynamicznych	601
21.8. Stany stacjonarne według Prigogine'a	604
21.9. Teoria fluktuacji	606
21.10. Zasada mikroskopowej odwracalności	610
21.11. Czwarta zasada termodynamiki Onsagera i założenia dotyczące prawa zaniku fluktuacji	612
21.12. Liniowa nieosobliwa transformacja przepływów i bodźców termodynamicznych	613
21.13. Ewolucja produkcji źródła entropii w czasie	617
21.14. Równoważność definicji stanów stacjonarnych według Prigogine'a i fenomenologicznej	619
21.15. Trwałość stanów stacjonarnych	620
21.16. Wyznaczanie źródła entropii	622
Dodatek A. Rozkład Boltzmann	624
Dodatek B. Operatory momentu pędu we współrzędnych sferycznych	630
Stałe fizyczne	635
Alfabet grecki	636
Wielokrotności i podwielokrotności jednostek miar	636
Bibliografia	637