

SPIS TREŚCI

PRZEDMOWA	13
PODSTAWOWE OZNACZENIA	15
WSTĘP	19
1. POJĘCIA PODSTAWOWE I JEDNOSTKI MIAR	21
1.1. Układy jednostek	21
1.2. Podstawowe definicje	23
1.3. Masa	26
1.4. Siła	26
1.5. Ilość substancji	26
1.6. Ciśnienie	28
1.6.1. Jednostki ciśnienia	28
1.6.2. Ciśnienie bezwzględne i manometryczne	29
1.6.3. Ciśnienie statyczne, dynamiczne i całkowite	29
1.7. Praca, ciepło, energia, moc	30
1.8. Temperatura	32
1.9. Objętość właściwa, gęstość masy, gęstość ciężaru	32
1.10. Dynamiczny i kinematyczny współczynnik lepkości	33
Zagadnienia i pytania sprawdzające	35
Przykłady	35
2. ZASADA ZACHOWANIA ILOŚCI SUBSTANCJI	37
2.1. Sformułowanie zasady zachowania ilości substancji	37
2.2. Bilans substancji	38
2.3. Udziały substancjalne	40
2.4. Bilanse pierwiastków w procesach chemicznych	42
Zagadnienia i pytania sprawdzające	42
Przykłady	42

3. PIERWSZA ZASADA TERMODYNAMIKI	44
3.1. Bilans energii	44
3.2. Energia układu, energia wewnętrzna, entalpia	46
3.3. Sposoby doprowadzania i wyprowadzania energii	47
3.4. Ciepło doprowadzone do układu	49
3.5. Energia doprowadzona ze strugą płynu	53
3.6. Praca mechaniczna	56
3.6.1. Rodzaje przemian. Warunki odwracalności	56
3.6.2. Praca bezwzględna	57
3.6.3. Praca użyteczna	59
3.6.4. Praca techniczna	60
3.6.5. Praca wykresowa, wewnętrzna i efektywna	62
3.7. Szczególne przypadki bilansu energii	64
3.7.1. Układ zamknięty. Równanie pierwszej zasady termodynamiki	64
3.7.2. Idealna maszyna przepływowa	66
3.7.3. Rzeczywista maszyna przepływowa	66
3.7.4. Wymiennik ciepła	67
3.7.5. Bilans energii w układach hydraulicznych	67
3.7.6. Układ ruchomy	68
3.8. Sprawność energetyczna	69
Zagadnienia i pytania sprawdzające	70
Przykłady	70
4. ENTROPIA I OBIEGI TERMODYNAMICZNE	74
4.1. Definicja entropii	74
4.2. Układ T,S (Belpaire'a)	76
4.3. Energia wewnętrzna swobodna, entalpia swobodna	77
4.4. Obiegi termodynamiczne	78
4.5. Transformatory ciepła	82
Zagadnienia i pytania sprawdzające	83
Przykłady	83
5. RÓWNANIA STANU GAZÓW I PAR	85
5.1. Definicja równania stanu	85
5.2. Definicja gazu doskonałego, półdoskonałego i rzeczywistego	86
5.3. Termiczne równanie stanu gazów doskonałych i półdoskonałych	87
5.3.1. Ciśnienie	87
5.3.2. Temperatura	87
5.3.3. Równanie Clapeyrona	89
5.3.4. Prawo Avogadra	89

5.3.5. Uniwersalne równanie stanu gazów doskonałych i półdoskonałych	90
5.4. Energia wewnętrzna, entalpia i entropia gazów doskonałych i półdoskonałych	91
5.4.1. Pojemność cieplna w stałej objętości i pod stałym ciśnieniem	91
5.4.2. Gazy doskonałe	94
5.4.3. Gazy półdoskonałe	99
5.5. Roztwory gazów doskonałych i półdoskonałych	104
5.5.1. Prawo Daltona	104
5.5.2. Termiczne równanie stanu roztworu	106
5.5.3. Termodynamiczne równania stanu roztworu	108
5.5.4. Powietrze	110
5.6. Przemiany charakterystyczne gazów doskonałych i półdoskonałych	110
5.6.1. Wiadomości ogólne	110
5.6.2. Izoterma	112
5.6.3. Izochora	114
5.6.4. Izobara	116
5.6.5. Izentropa	118
5.6.6. Politropa	121
5.6.7. Dławienie	126
5.6.8. Adiabata nieodwracalna	128
5.6.9. Dyfuzja	131
5.7. Przemiany fazowe substancji jednorodnych	132
5.7.1. Stany skupienia	132
5.7.2. Izobaryczny proces parowania	135
5.7.3. Objętość właściwa pary nasyconej i przegrzanej	137
5.7.4. Termodynamiczne równania stanu pary nasyconej i przegrzanej	140
5.7.5. Przemiany charakterystyczne pary nasyconej i przegrzanej	146
5.7.6. Równanie Clapeyrona-Clausiusa	152
5.8. Termiczne równania stanu gazów rzeczywistych	153
5.8.1. Równanie van der Waalsa	153
5.8.2. Inne termiczne równania stanu	160
5.9. Wpływ termicznego równania stanu na parametry termodynamiczne	162
5.9.1. Entalpia i entropia gazu rzeczywistego	162
5.9.2. Równania Maxwella	164
5.9.3. Efekt Joule'a-Thomsona	167
5.9.4. Zależność entalpii przemiany fazowej od temperatury	170

5.9.5. Lokalny wykładnik izentropy	171
5.9.6. Aktywność ciśnieniowa	172
Zagadnienia i pytania sprawdzające	178
Przykłady	179
6. DRUGA ZASADA TERMODYNAMIKI	189
6.1. Sformułowanie drugiej zasady termodynamiki	189
6.2. Termodynamiczna skala temperatury. Obieg Carnota	191
6.3. Matematyczne ujęcie drugiej zasady termodynamiki	194
6.4. Warunki równowagi termodynamicznej	198
6.5. Statystyczna interpretacja drugiej zasady termodynamiki	201
6.6. Praca maksymalna	206
6.7. Egzergia, straty egzergii, sprawność egzergetyczna	208
6.7.1. Definicja egzergii	208
6.7.2. Zmiana egzergii termicznej w przemianie fizycznej lub chemicznej	210
6.7.3. Prawo Gouya-Stodoli	211
6.7.4. Bilans egzergii	214
6.7.5. Obliczanie egzergii termicznej	219
6.7.6. Zastosowania egzergii	222
6.7.7. Straty egzergii w typowych procesach nie- odwracalnych	223
Zagadnienia i pytania sprawdzające	226
Przykłady	227
7. ROZTWORY DWUSKŁADNIKOWE	233
7.1. Częstkowe parametry właściwe	233
7.1.1. Definicja i wyznaczanie cząstkowych parametrów właściwych	233
7.1.2. Roztwory doskonałe	236
7.1.3. Roztwór rozcieńczony	238
7.1.4. Roztwór rzeczywisty	238
7.2. Potencjał chemiczny	241
7.2.1. Definicja potencjału chemicznego	241
7.2.2. Reguła faz Gibbsa	244
7.2.3. Aktywność składników roztworu	244
7.3. Gazy wilgotne	247
7.3.1. Termiczne równanie stanu gazu wilgotnego	247
7.3.2. Entalpia i energia wewnętrzna gazu wilgotnego	251
7.3.3. Wykres i, X powietrza wilgotnego	253
7.3.4. Egzergia powietrza wilgotnego	256
7.3.5. Izobaryczne przemiany powietrza wilgotnego	260

7.4. Równowaga roztworów ciekłych z roztworami gazowymi i stałymi	275
7.4.1. Rozpuszczalność gazów w cieczach	275
7.4.2. Równowaga roztworów ciekłych i stałych	275
7.4.3. Równowaga roztworów ciekłych i gazowych	279
7.4.4. Wykresy termodynamiczne roztworów dwuskładnikowych	282
7.4.5. Typowe przemiany roztworów dwuskładnikowych	285
7.5. Rozdzielanie składników roztworu cieczy	290
7.5.1. Zasada rektyfikacji	290
7.5.2. Kolumna rektyfikacyjna zagęszczająca	292
7.5.3. Kolumna odpędzająca	297
7.5.4. Sprzężona kolumna rektyfikacyjna	299
7.5.5. Straty egzergii w procesie rektyfikacji	300
Zagadnienia i pytania sprawdzające	302
Przykłady	303
8. PODSTAWY TERMODYNAMIKI CHEMICZNEJ	310
8.1. Entalpia, entropia i swobodna entalpia reakcji chemicznej standardowej	310
8.1.1. Stan standardowy	310
8.1.2. Reakcja chemiczna standardowa	312
8.1.3. Entalpia i entropia reakcji standardowej	313
8.1.4. Praca maksymalna reakcji standardowej	315
8.1.5. Wpływ ciśnienia na pracę maksymalną reakcji izobaryczno-izotermicznej	316
8.1.6. Reakcja tworzenia	317
8.2. Obliczanie entalpii w procesach chemicznych	319
8.2.1. Substancje odniesienia	319
8.2.2. Zastosowanie entalpii tworzenia	321
8.2.3. Wartość opałowa i entalpia spalania	322
8.2.4. Entalpia dewaluacji	324
8.3. Trzecia zasada termodynamiki	327
8.3.1. Równanie Gibbsa-Helmholtza	327
8.3.2. Teoremat Nernsta	329
8.3.3. Postulat Plancka	331
8.3.4. Podstawowe konsekwencje trzeciej zasady termodynamiki	332
8.3.5. Egzergia a nieosiągalność zera bezwzględnego	336
8.3.6. Kalorymetryczna metoda wyznaczania entropii chemicznej	337

8.3.7. Kwantowo-statystyczna metoda obliczania entropii chemicznej	337
8.3.8. Porównanie entropii kalorymetrycznej i spektroskopowej. Ograniczenia trzeciej zasady termodynamiki	342
8.4. Równowaga chemiczna	344
8.4.1. Reakcje chemiczne między gazami półdoskonałymi . . .	345
8.4.2. Stopień dysocjacji	353
8.4.3. Reakcje między gazami półdoskonałymi z udziałem ciał stałych i ciekłych	355
8.4.4. Reakcje między gazami rzeczywistymi	359
8.4.5. Minimalizacja swobodnej entalpii	361
8.5. Egzergia w procesach chemicznych	361
8.5.1. Ogólne zasady obliczania egzergii chemicznej	361
8.5.2. Egzergia chemiczna normalna	364
8.5.3. Obliczanie egzergii chemicznej związków za pomocą egzergii chemicznej pierwiastków	368
8.5.4. Obliczanie pracy maksymalnej reakcji za pomocą egzergii chemicznej	369
Zagadnienia i pytania sprawdzające	369
Przykłady	370
9. SPALANIE	378
9.1. Stechiometria spalania	378
9.1.1. Skład paliw	379
9.1.2. Spalanie zupełne i całkowite	381
9.1.3. Spalanie niezupełne i niecałkowite	388
9.1.4. Wykresy kontrolne spalania	393
9.2. Wartość opałowa i egzergia paliw	397
9.2.1. Wartość opałowa paliw	397
9.2.2. Temperatura spalania	399
9.2.3. Egzergia chemiczna paliw	400
9.3. Straty energii i egzergii w procesach spalania	402
9.3.1. Sprawność energetyczna i egzergiczna w procesie spalania	402
9.3.2. Straty energii przy spalaniu	404
9.3.3. Straty egzergii przy spalaniu	406
9.3.4. Wpływ dysocjacji na temperaturę spalania i stratę egzergii	412
9.4. Ogniwa paliwowe	416
Zagadnienia i pytania sprawdzające	418
Przykłady	419

10. USTALONY PRZEPŁYW GAZÓW	429
10.1. Równania ciągłości strugi i bilansu energii	429
10.1.1. Pojęcia podstawowe	429
10.1.2. Bilans energii	431
10.1.3. Prędkość przepływu	432
10.2. Adiabatyczne beztarciove rozprężanie gazu doskonałego	434
10.2.1. Prędkość przepływu	434
10.2.2. Kształt kanału	435
10.2.3. Prędkość krytyczna	438
10.2.4. Strumień czynnika	440
10.3. Przepływ adiabatyczny z tarcie	441
10.3.1. Krzywa Fanno	441
10.3.2. Dysza Bendemanna (otwór zaokrąglony)	442
10.4. Przepływ adiabatyczny ze skokową zmianą gęstości	446
10.4.1. Rozprzestrzenianie się zaburzenia ciśnienia	446
10.4.2. Prosta fala uderzeniowa	447
10.4.3. Działanie dyszy de Laval'a przy zmiennym przeciwcisnieniu	451
10.5. Związki miernicze	453
10.5.1. Klasyfikacja związków	453
10.5.2. Normalna kreza miernicza	455
10.5.3. Liczba przepływu	457
10.6. Strata ciśnienia w rurociągach	459
10.6.1. Praca tarcia	459
10.6.2. Przepływ cieczy w poziomym rurociągu	461
10.6.3. Przepływ gazu w długim poziomym rurociągu	462
10.6.4. Przepływ gazu w krótkim rurociągu	464
10.6.5. Lokalne straty ciśnienia	464
10.7. Bilans energii i egzergii dla ruchomych układów otwartych	465
10.7.1. Energia strugi płynu przecinającej ruchomą osłonę kontrolną	465
10.7.2. Bilans energii dla układu otwartego	467
10.7.3. Egzergia strugi przecinającej ruchomą osłonę kontrolną	468
10.8. Dynamiczne działanie strugi	469
10.8.1. Wzór ogólny	469
10.8.2. Przykłady zastosowań	472
10.9. Działanie akcyjnego i reakcyjnego stopnia turbiny	474
10.9.1. Akcyjny stopień turbiny	474
10.9.2. Reakcyjny stopień turbiny	477
Zagadnienia i pytania sprawdzające	480
Przykłady	480

11. SPRĘŻARKI	486
11.1. Klasyfikacja sprężarek	486
11.2. Praca sprężania	488
11.2.1. Sprężanie jednostopniowe w idealnej maszynie przepływowej	488
11.2.2. Sprężanie wielostopniowe z chłodzeniem międzystopniowym	491
11.2.3. Sprawność wewnętrzna i efektywna sprężarek	493
11.3. Sprężarki tłokowe	494
11.3.1. Sprawność wolumetryczna	494
11.3.2. Przebieg sprężania w sprężarce tłokowej	495
11.4. Sprężarki rotodynamiczne	496
11.4.1. Opis sprężarki odśrodkowej	496
11.4.2. Opis sprężarki osiowej	497
11.4.3. Podstawowe równanie sprężarek rotodynamicznych	498
11.4.4. Wewnętrzna moc napędowa sprężarki rotodynamicznej	501
11.4.5. Wentylatory	501
11.5. Charakterystyki sprężarek	502
11.6. Transmisja energii za pomocą sprężonego powietrza	505
Zagadnienia i pytania sprawdzające	506
12. SIŁOWNIE PAROWE	507
12.1. Obieg porównawczy siłowni parowej	507
12.1.1. Możliwości zrealizowania obiegu Carnota w siłowni parowej	507
12.1.2. Obieg Clausiusa-Rankine'a	509
12.1.3. Sposoby zwiększenia sprawności energetycznej obiegu siłowni parowej	515
12.2. Siłownie parowe dwuczynnikiowe	522
12.3. Sprawność siłowni parowej	523
12.3.1. Klasyczna siłownia parowa	523
12.3.2. Dowolna kondensacyjna siłownia parowa	528
12.4. Elektrociepłownie parowe	528
Zagadnienia i pytania sprawdzające	532
Przykłady	533
13. SILNIKI SPALINOWE I SIŁOWNIE TURBOGAZOWE	542
13.1. Sprawność silników spalinowych i siłowni turbogazowych	542

13.2. Obiegi porównawcze silników spalinowych tłokowych . . .	544
13.2.1. Obieg Otto	544
13.2.2. Obieg Diesla	547
13.2.3. Obieg Seiligera-Sabathégo	549
13.3. Obiegi porównawcze silowni turbogazowych	551
13.3.1. Obieg Braytona-Armengauda	551
13.3.2. Obieg Ericsona	558
13.4. Akumulacja energii z zastosowaniem turbiny spalinowej	560
13.5. Obieg porównawczy silnika odrzutowego	562
13.6. Silownie parowo-gazowe	564
13.7. Elektrociepłownie parowo-gazowe	568
Zagadnienia i pytania sprawdzające	571
Przykłady	571
14. ZIĘBIARKI I POMPY GRZEJNE	580
14.1. Klasyfikacja i sprawność ziębiarek	580
14.1.1. Typy ziębiarek	580
14.1.2. Sprawność ziębiarek	581
14.2. Ziębiarki sprężarkowe gazowe	583
14.3. Ziębiarki sprężarkowe parowe	585
14.3.1. Obieg Lindego	585
14.3.2. Wykres i , lgp	591
14.3.3. Sprawności cząstkowe ziębiarki parowej sprężarkowej	592
14.3.4. Czynniki obiegowe ziębiarek parowych	594
14.3.5. Obiegi wielostopniowe ziębiarek parowych sprężarkowych	595
14.4. Ziębiarki ciepłne	597
14.4.1. Ziębiarki absorpcyjne	597
14.4.2. Ziębiarki próżniowe	598
14.5. Skraplanie gazów	599
14.5.1. Proces Lindego	599
14.5.2. Proces Claude'a-Heylandta	603
14.5.3. Proces Kapicy	605
14.5.4. Zastosowanie ziębiarki parowej sprężarkowej z wieloskładnikowym czynnikiem obiegowym	607
14.6. Pompy grzejne	609
14.6.1. Sprawność pomp grzejnych	609
14.6.2. Przykłady zastosowań pomp grzejnych	612
Zagadnienia i pytania sprawdzające	617
Przykłady	618

15. OGÓLNE ZASADY ZMNIEJSZANIA NIEDOSKONAŁOŚCI TERMODYNAMICZNEJ PROCESÓW CIEPLNYCH	621
16. PODSTAWY TERMODYNAMIKI PROCESÓW NIERÓWNO- WAGOWYCH	628
16.1. Zjawiska sprzężone	628
16.2. Lokalne sformułowanie drugiej zasady termo- dynamiki	629
16.3. Równania fenomenologiczne	633
16.4. Czwarta zasada termodynamiki	636
16.5. Procesy nierównowagowe ustalone	638
16.6. Termodynamika zjawisk termoelektrycznych	639
16.6.1. Zjawiska Peltiera i Thomsona	639
16.6.2. Generatory i ziębiarki termoelektryczne	644
Zagadnienia i pytania sprawdzające	650
Przykłady	650
ZESTAWIENIA	652
BIBLIOGRAFIA	676
SKOROWIDZ	678
WYKAZ WYKRESÓW	686