

Spis treści

Od Autora	7
Wykaz ważniejszych oznaczeń	9
1. Pojęcia podstawowe	13
1.1. Oznaczenia wielkości	13
1.2. Zasady zachowania i funkcje termodynamiczne	15
1.2.1. Zasada zachowania substancji (masy)	15
1.2.2. Zasada zachowania energii. Bilans energii	16
1.2.3. Zasada zachowania pędu	20
1.2.4. Pierwsza zasada termodynamiki	21
1.2.5. Podstawowe zależności termodynamiczne	22
1.2.6. Zasada wzrostu entropii	28
1.3. Pojęcia i definicje	32
I. METODY CHŁODZENIA I ZIĘBIENIA	
2. Przemiany fazowe	39
2.1. Rodzaje przemian fazowych. Wykresy fazowe	39
2.2. Termodynamika przejść fazowych	43
2.3. Topnienie lodu	49
2.4. Wrzenie	52
2.5. Sublimacja	55
2.5.1. Suchy lód – stały dwutlenek węgla	56
3. Roztwory i mieszaniny oziębiające	59
3.1. Roztwory dwuskładnikowe – pojęcia podstawowe	59
3.2. Roztwory doskonałe	61
3.3. Roztwory rzeczywiste	65
3.3.1. Ciepło mieszania roztworu	68
3.3.2. Entalpia roztworu	72
3.3.3. Właściwa pojemność cieplna roztworu	74
3.3.4. Entropia roztworu	74
3.4. Mieszaniny eutektyczne	75
3.4.1. Chłodzenie lodem z solą	76
3.5. Lód z roztworów eutektycznych	85
3.6. Solanki – nośniki zimna	87
3.6.1. Zasady doboru solanek	89
3.7. Lód binarny (zawiesina lodowa)	91
3.7.1. Własności fizyczne i cieplne zawiesiny lodowej	92
3.8. Specjalne wykresy równowagi fazowej	95
3.9. Proces wrzenia roztworu dwuskładnikowego	98
3.10. Proces skraplania roztworu dwuskładnikowego	102
4. Oziębianie przez ekspansję gazów. Proces $s = \text{const}$	105

4.1.	Ekspansja gazu doskonałego	105
4.1.1.	Spadek temperatury podczas ekspansji gazu dla przemian politropowych	106
4.1.2.	Ciepło przemiany politropowej	108
4.2.	Ekspansja gazu rzeczywistego	114
5.	Swobodny wypływ sprężonego gazu	119
6.	Ekspansja gazu przez dławienie. Efekt Joule'a-Thomsona	123
6.1.	Elementarny różniczkowy efekt Joule'a-Thomsona	124
6.2.	Krzywa inwersji	126
6.3.	Izotermiczny efekt dławienia	132
6.4.	Całkowy efekt Joule'a-Thomsona	134
6.5.	Wartości elementarnego efektu Joule'a-Thomsona	136
6.6.	Efekt dławienia w skraplarkach Joule'a-Thomsona	140
6.7.	Efekt dławienia w ziębiarkach sprężarkowych	142
6.7.1.	Rurki kapilarne	143
6.7.2.	Proces dławienia ziębnika rurce kapilarnej	144
6.7.3.	Proces dławienia dwufazowego ziębnika	146
6.7.4.	Diabatyckość procesu dławienia. Wpływ wymiany ciepła	150
6.7.5.	Warunki powstawania przepływów krytycznych	153
7.	Proces $u = \text{const}$	163
8.	Efekt wirowy	167
8.1.	Podstawy teoretyczne działania rury wirowej Ranque'a	169
8.2.	Ocena pracy rury Ranque'a	171
8.3.	Geometria rury wirowej	174
8.4.	Wpływ parametrów gazu zasilającego na charakterystyki pracy rury wirowej	175
8.5.	Rura Ranque'a w systemie ziębnienia	179
8.6.	Obliczanie i projektowanie efektu wirowego i rury Ranque'a	179
9.	Efekt termoelektryczny	185
9.1.	Zjawiska termoelektryczne	185
9.2.	Termodynamika ziębniczego i grzejnego obiegu termoelektrycznego	188
9.3.	Parametry pracy termoelementu	195
9.3.1.	Maksymalna wydajność ziębnicza termoelementu $Q_{0\text{max}}$	196
9.3.2.	Maksymalna wartość współczynnika efektywności ziębnicznej ϵ_{max}	197
9.3.3.	Parametry geometryczne termoelementu	200
9.3.4.	Optymalne warunki pracy termoelementu	202
9.4.	Własności materiałów termoelektrycznych	203
9.4.1.	Przewodność elektryczna	204
9.4.2.	Przewodność cieplna	206
9.4.3.	Współczynnik siły termoelektrycznej	207
9.4.4.	Maksymalizacja wartości parametru Z	208
9.5.	Straty energetyczne urządzenia termoelektrycznego	211
9.5.1.	Stopień doskonałości termobaterii	213
9.5.2.	Straty układu zasilania	214

II. METODY WYTWARZANIA NISKICH TEMPERATUR

10.	Rozcieńczanie ^3He w ^4He	221
11.	Oziębianie przez adiabatyczne zestalanie ^3He	227
12.	Desorpcja gazów	233
12.1.	Podstawowe zależności i teoria adsorpcji	234

12.2. Desorpcja helu	239
13. Rozmagnesowanie adiabatyczne	241
13.1. Energia namagnesowania	242
13.2. Substancje paramagnetyczne	243
13.3. Zjawisko magnetokaloryczne	245
13.4. Teoria rozmagnesowania adiabatycznego	247
13.5. Realizacja procesu	251
13.6. Najniższe temperatury. Rozmagnesowanie jądrowe	255

III. OBIEGI ZIĘBNICZE

14. Pojęcie obiegu termodynamicznego	259
14.1. Odwracalne obiegi ziębnicze	263
14.1.1. Odwracalny obieg ziębniczy realizowany przy niezmienniej temperaturze źródeł ciepła	264
14.1.2. Odwracalny obieg ziębniczy realizowany przy zmiennej temperaturze źródeł ciepła	269
14.2. Nieodwracalne obiegi ziębnicze	274
14.2.1. Charakterystyka procesów nieodwracalnych	275
14.2.2. Nieodwracalność w realizacji obiegu Carnota	277
15. Obiegi gazowe (ziębiarki gazowe)	283
15.1. Teoretyczny obieg ziębiarki gazowej	283
15.2. Rzeczywisty obieg ziębiarki gazowej	287
15.3. Teoretyczny obieg ziębiarki gazowej z rekuperacją ciepła	289
15.4. Modyfikacje obiegów ziębiarek gazowych	292
15.4.1. Obieg otwarty ziębiarki gazowej	292
16. Obiegi parowe ziębiarek sprężarkowych	297
16.1. Metody opisu obiegu ziębiarki sprężarkowej	297
16.2. Teoretyczny obieg Carnota	300
16.3. Teoretyczny obieg Lindego	303
16.4. Teoretyczny obieg suchy Lindego	308
16.5. Teoretyczny obieg suchy Lindego z dochłodzeniem ciekłego ziębnika	314
16.6. Teoretyczny obieg Lindego z rekuperacją ciepła. Obieg z doziębianiem	316
16.7. Wpływ temperatury parowania na współczynnik efektywności ziębniczej	320
16.8. Wpływ temperatury skraplania na współczynnik efektywności ziębniczej	321
16.9. Obliczenia termodynamicznych obiegów ziębniczych jednostopniowych	322
17. Teoretyczne dwustopniowe obiegi ziębnicze	327
17.1. Obieg z dwustopniowym sprężaniem czynnika ziębniczego	329
17.2. Obieg z dwustopniowym sprężaniem i dwustopniowym dławieniem czynnika ziębniczego	332
17.3. Obieg z dwustopniowym sprężaniem, dwustopniowym dławieniem i dwustopniowym parowaniem czynnika ziębniczego	337
17.4. Obiegi dwustopniowych układów specjalnych	339
18. Obiegi kaskadowe	341
19. Rzeczywiste obiegi jednostopniowe parowych ziębiarek sprężarkowych	349
19.1. Ocena strat w sprężarce tłokowej	350
19.1.1. Straty objętościowe	351
19.1.2. Wskaźnik przestrzeni szkodliwej λ_s	352
19.1.3. Wskaźnik strat dławienia λ_d	354

19.1.4. Wskaźnik podgrzania λ_g	356
19.1.5. Wskaźnik nieszczelności λ_n	357
19.2. Straty energetyczne	358
19.3. Ocena pracy sprężarki w instalacji ziębniczej	363
19.4. Ocena energetyczna rzeczywistego systemu ziębniczego	366
19.5. Rzeczywisty obieg ziębniczy	368
20. Obiegi parowe ziębiarek sorpcyjnych	371
20.1. Podział ziębiarek sorpcyjnych	373
20.2. Obieg parowy ziębiarki na roztwór wodny amoniaku	374
20.3. Obieg parowy ziębiarki na roztwór wodny bromku litu	383
20.3.1. Bilans cieplny ziębiarki bromolitowej	384
20.4. Obieg parowy ziębiarki absorpcyjnej trójszczynnikowej z wodorem jako gazem obojętnym	389
20.5. Metody opisu absorpcyjnych parowych obiegów ziębniczych	393
20.5.1. Teoretyczny obieg ziębiarki absorpcyjnej	396
20.5.2. Rzeczywisty obieg ziębiarki absorpcyjnej	400
20.5.3. Odstępstwa procesów obiegu rzeczywistej ziębiarki od teoretycznej	402
20.6. Bilans ziębiarki absorpcyjnej na roztwór wodny amoniaku	406
20.6.1. Bilans wężownicy i rektyfikatora	408
20.6.2. Bilans energetyczny wężownicy i rektyfikatora	410
20.6.3. Bilans entropii wężownicy i rektyfikatora	411
20.6.4. Bilans absorbera ziębiarki	414
20.6.5. Bilans rekuperatora	417
20.6.6. Bilans skraplacza	419
20.6.7. Bilans zaworu dławiącego	421
20.6.8. Bilans parowacza	423
20.6.9. Bilans doziębiacza	425
20.6.10. Bilans pompy roztworu	426
20.7. Obiegi specjalne ziębiarek sorpcyjnych	430
20.7.1. Obieg jednostopniowej ziębiarki resorpcyjnej o działaniu ciągłym	430
20.7.2. Obieg ziębiarki absorpcyjnej dwustopniowej na roztwór dwuskładnikowy o działaniu ciągłym	433
20.7.3. Obieg ziębiarki absorpcyjnej o działaniu ciągłym na roztwór wodny bromku litu	435
20.8. Charakterystyki pracy ziębiarek absorpcyjnych	437
Literatura	445
Skorowidz	453