

**Termodynamiczne podstawy obiegu chłodniczych i kriogenicznych /
Bogusław Białko, Zbigniew Królicki, Bartosz Zajączkowski. – Wrocław,
2016**

Spis treści

Od autorów	7
Wykaz ważniejszych oznaczeń	9
1. Pojęcie obiegu termodynamicznego	13
1.1. Odwracalne obiegi ziębnicze	19
1.1.1. Odwracalny obieg ziębniczy realizowany przy niezmienniej temperaturze źródeł ciepła	19
1.1.2. Odwracalny obieg ziębniczy realizowany przy zmiennej temperaturze źródeł ciepła	25
1.2. Nieodwracalne obiegi ziębnicze	29
1.2.1. Charakterystyka procesów nieodwracalnych	29
1.2.2. Nieodwracalność w realizacji obiegu Carnota	31
2. Obiegi gazowe (ziębiarki gazowe)	37
2.1. Obieg gazowy o stałych temperaturach źródeł - obieg Carnota	37
2.2. Teoretyczny obieg o zmiennych temperaturach źródeł - obieg Joule'a	42
2.2.1. Wpływ stopnia sprężania na efektywność obiegu Joule'a	45
2.3. Rzeczywisty obieg ziębiarki gazowej	48
2.4. Teoretyczny obieg Joule'a z rekuperacją ciepła	50
2.5. Obieg z rekuperacją ciepła - obieg Ackereeta-Kellera	53
2.6. Obieg Philipsa (Stirlinga)	57
2.7. Obieg otwarty ziębiarki gazowej	64
3. Obiegi parowe ziębiarek sprężarkowych	67
3.1. Metody opisu obiegu ziębiarki sprężarkowej	67
3.1.1. Wykresy fazowe	69
3.1.2. Szczególne przypadki wykresów fazowych	73
3.2. Teoretyczny obieg Carnota	74
3.3. Teoretyczny obieg Lindego	76
3.4. Teoretyczny obieg suchy Lindego	82
3.5. Teoretyczny obieg suchy Lindego z dochłodzeniem ciekłego ziębnika	87
3.6. Teoretyczny obieg Lindego z rekuperacją ciepła - obieg z doziębaniem	89
3.7. Wpływ temperatury parowania na współczynnik efektywności	

ziębniczej	94
3.8. Wpływ temperatury skraplania na współczynnik efektywności ziębniczej	96
3.9. Obliczanie termodynamicznych obiegów ziębniczych jednostopniowych	97
4. Dwustopniowe obiegi ziębnicze	101
4.1. Metody doboru ciśnienia międzystopniowego w obiegach dwustopniowych	104
4.2. Obieg z dwustopniowym sprężaniem czynnika ziębniczego	107
4.3. Obieg z dwustopniowym sprężaniem i dwustopniowym dławieniem czynnika ziębniczego	109
4.4. Obieg z dwustopniowym sprężaniem, dwustopniowym dławieniem i dwustopniowym parowaniem czynnika ziębniczego	114
4.5. Obiegi dwustopniowych układów specjalnych	116
4.5.1. Obieg dwustopniowy Voorheesa	117
4.5.2. Obieg Windhausena	119
4.5.3. Obieg jednostopniowy z dławieniem pary zasysanej	120
4.5.4. Obieg z osuszaczem	121
4.5.5. Obieg z wtryskiem cieczy do przewodu ssawnego	124
4.5.6. Obieg Granryda	126
4.5.7. Obieg z ekonomizerem	128
4.5.8. Obieg z wtryskiem ciekłego czynnika do przewodu tłocznego	129
4.5.9. Ocena efektywności termodynamicznej obiegów dwustopniowych	130
5. Teoretyczne trójstopniowe obiegi ziębnicze	135
6. Obiegi kaskadowe	141
7. Rzeczywiste obiegi jednostopniowe parowych ziębiarek sprężarkowych	149
7.1. Ocena strat w sprężarce tłokowej	150
7.1.1. Straty objętościowe	151
7.1.2. Wskaźnik przestrzeni szkodliwej λ_s	152
7.1.3. Wskaźnik strat dławienia λ_d	154
7.1.4. Wskaźnik podgrzania λ_q	156
7.1.5. Wskaźnik nieszczelności λ_n	157
7.2. Straty energetyczne	158
7.3. Ocena pracy sprężarki w instalacji ziębniczej	163
7.4. Ocena energetyczna rzeczywistego systemu ziębniczego	166
7.5. Rzeczywisty obieg ziębniczy	168
8. Obiegi transkrytyczne	171
8.1. Podstawowe konfiguracje wyposażenia instalacji do realizacji transkrytycznych obiegów termodynamicznych	171

8.2. Wielostopniowe obiegi realizowane z CO ₂ jako czynnikiem ziębniczym	174
8.3. Określenie efektywności realizacji lewobieżnych obiegów transkrytycznych	183
8.4. Wpływ doziębienia na efektywność obiegu transkrytycznego	185
8.5. Efektywność realizacji obiegu transkrytycznego z zastosowaniem rozprężarki	188
8.6. Modelowanie efektywności urządzeń realizujących obieg transkrytyczny	190
9. Obiegi rzeczywiste pomp ciepła	195
9.1. Obieg teoretyczny (porównawczy) pompy ciepła	200
9.2. Procesy nieodwracalne w pompie ciepła	204
9.2.1. Rzeczywista efektywność pompy ciepła	204
9.3. Termodynamiczne aspekty doboru obiegu porównawczego rzeczywistej pompy ciepła	210
9.3.1. Wpływ nieodwracalności procesu wymiany ciepła na wybór obiegu porównawczego pompy ciepła	212
9.4. Optymalny obieg pompy ciepła	213
10. Obiegi kriogeniczne	219
10.1. Termodynamiczne podstawy oziębienia wewnętrznego	221
10.2. Swobodny wypływ sprężonego gazu z dużej objętości	226
10.3. Obieg Carnota w ziębiarce kriogenicznej	230
10.4. Wskaźniki oceniające i porównawcze obiegów kriogenicznych	234
10.5. Obieg Lindego-Hampsona	236
10.5.1. Bilans obiegu skraplarki Lindego-Hampsona	240
10.5.2. Bilans ziębiarki Lindego-Hampsona	243
10.6. Obieg Lindego-Hampsona z wstępnym oziębieniem	243
10.7. Obieg Lindego-Hampsona z dwustopniowym dławieniem i rozdzieleniem strumienia gazu	246
10.8. Obiegi kriogeniczne z rozprężarkami	248
10.8.1. Obieg Claude'a	248
10.8.2. Obieg Heylandta	252
10.8.3. Obieg Kapicy	253
10.9. Obieg trójstopniowy	255
10.10. Obieg Gifforda-MacMahona	256
10.11. Obieg Solvaya	259
Literatura	261