

# Spis treści

|                                                                        |           |
|------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Przedmowa do wydania w języku angielskim .....                         | 11        |
| Przedmowa do drugiego wydania polskiego .....                          | 13        |
| Wykaz ważniejszych oznaczeń .....                                      | 17        |
| <b>1. Wprowadzenie i podstawy termodynamiki .....</b>                  | <b>19</b> |
| 1.1. Wprowadzenie .....                                                | 19        |
| 1.2. Własności fizyczne i termodynamiczne substancji .....             | 20        |
| 1.3. Stan fizyczny substancji .....                                    | 21        |
| 1.4. Gazy i pary .....                                                 | 25        |
| 1.5. Zasady termodynamiki i przemiany termodynamiczne .....            | 28        |
| 1.6. Roztwory czynników chłodniczych .....                             | 33        |
| <b>2. Obieg chłodniczy sprężarkowy .....</b>                           | <b>35</b> |
| 2.1. Obieg Carnota .....                                               | 35        |
| 2.2. Obieg Lorenza .....                                               | 36        |
| 2.3. Obieg Lindego .....                                               | 38        |
| 2.4. Obieg Joule'a .....                                               | 39        |
| <b>3. Czynniki chłodnicze i chłodziwa .....</b>                        | <b>42</b> |
| 3.1. Czynniki chłodnicze .....                                         | 42        |
| 3.1.1. Systematyka czynników chłodniczych .....                        | 42        |
| 3.1.2. Wskaźniki ekologicznej oceny czynników chłodniczych .....       | 45        |
| 3.1.3. Regulacje ograniczające stosowanie czynników chłodniczych ..... | 50        |
| 3.1.4. Ocena własności termodynamicznych czynników chłodniczych .....  | 52        |
| 3.1.5. Charakterystyka wybranych czynników chłodniczych .....          | 58        |
| 3.1.5.1. Czynniki naturalne .....                                      | 60        |

|                                                                                         |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.1.5.2. Czynniki syntetyczne .....                                                     | 66         |
| 3.2. Chłodziwa .....                                                                    | 71         |
| 3.2.1. Solanki .....                                                                    | 72         |
| 3.2.2. Chłodziwa pochodzenia organicznego .....                                         | 75         |
| 3.2.3. Lód zawieszinowy .....                                                           | 76         |
| 3.3. Oleje chłodnicze .....                                                             | 77         |
| <b>4. Analiza urządzeń chłodniczych sprężarkowych .....</b>                             | <b>82</b>  |
| 4.1. Urządzenia jednostopniowe .....                                                    | 82         |
| 4.2. Urządzenia dwustopniowe .....                                                      | 85         |
| 4.2.1. Urządzenia dwustopniowe z jednostopniowym dławieniem .....                       | 86         |
| 4.2.2. Urządzenia dwustopniowe z dwustopniowym dławieniem .....                         | 88         |
| 4.3. Urządzenia kaskadowe .....                                                         | 89         |
| 4.4. Pompy ciepła .....                                                                 | 90         |
| <b>5. Urządzenia chłodnicze niskotemperaturowe .....</b>                                | <b>94</b>  |
| 5.1. Obieg Lindego .....                                                                | 94         |
| 5.2. Obieg Claude'a .....                                                               | 96         |
| 5.3. Obieg Kapicy .....                                                                 | 97         |
| <b>6. Urządzenia absorpcyjne .....</b>                                                  | <b>99</b>  |
| 6.1. Podstawy termodynamiki roztworów .....                                             | 99         |
| 6.2. Obieg urządzenia absorpcyjnego .....                                               | 104        |
| <b>7. Analiza pracy absorpcyjnych i strumienicowych<br/>urządzeń chłodniczych .....</b> | <b>106</b> |
| 7.1. Wielokrotność cyrkulacji roztworu .....                                            | 106        |
| 7.1.1. Bilans strumieni masy roztworu dwóch cieczy .....                                | 106        |
| 7.1.2. Bilans strumieni masy roztworu soli w cieczy .....                               | 107        |
| 7.2. Urządzenie absorpcyjne amoniakalno-wodne .....                                     | 108        |
| 7.3. Urządzenie absorpcyjne amoniakalno-wodne z gazem wyrównawczym .....                | 112        |
| 7.4. Urządzenie absorpcyjne bromolitowe .....                                           | 113        |
| 7.5. Absorpcyjne pompy ciepła .....                                                     | 117        |
| 7.6. Transformator ciepła .....                                                         | 119        |
| 7.7. Urządzenie chłodnicze strumienicowe .....                                          | 123        |
| <b>8. Powietrze wilgotne .....</b>                                                      | <b>126</b> |
| 8.1. Wilgotność bezwzględna .....                                                       | 126        |
| 8.2. Zawartość wilgoci .....                                                            | 127        |
| 8.3. Wilgotność względna .....                                                          | 127        |
| 8.4. Entalpia powietrza wilgotnego .....                                                | 128        |
| 8.5. Ciepło właściwe powietrza wilgotnego .....                                         | 128        |
| 8.6. Objętość właściwa powietrza wilgotnego .....                                       | 129        |
| 8.7. Wykres własności powietrza wilgotnego .....                                        | 129        |
| 8.8. Temperatura termometru mokrego .....                                               | 129        |
| 8.9. Temperatura punktu rosy .....                                                      | 130        |

|                                                                                          |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>9. Procesy wymiany ciepła i masy w powietrzu wilgotnym</b>                            | <b>132</b> |
| 9.1. Mieszanie strumieni powietrza                                                       | 132        |
| 9.2. Ogrzewanie oraz ochładzanie powietrza przez powierzchnie suche                      | 133        |
| 9.3. Ogrzewanie oraz ochładzanie powietrza przez powierzchnie wilgotne                   | 134        |
| 9.4. Nawilżanie izotermiczne powietrza                                                   | 136        |
| 9.5. Nawilżanie adiabatyczne powietrza                                                   | 137        |
| 9.6. Liczba Lewisa                                                                       | 138        |
| 9.7. Adiabatyczne chemiczne procesy osuszania powietrza                                  | 141        |
| 9.8. Potencjał entalpii                                                                  | 141        |
| <b>10. Jakość powietrza w systemach klimatyzacji</b>                                     | <b>145</b> |
| <b>11. Obiegi klimatyzacyjne powietrza wilgotnego</b>                                    | <b>148</b> |
| 11.1. Obiegi klimatyzacyjne o przeważających zyskach wilgoci                             | 148        |
| 11.2. Obiegi klimatyzacyjne o przeważających zyskach ciepła jawnego                      | 152        |
| <b>12. Systemy klimatyzacji</b>                                                          | <b>157</b> |
| 12.1. Systemy wielostrefowe z podgrzewem wtórnym                                         | 157        |
| 12.2. Systemy o zmiennym strumieniu objętości powietrza                                  | 158        |
| 12.3. Systemy zdecentralizowane                                                          | 159        |
| 12.4. Systemy jednostrefowe                                                              | 160        |
| <b>13. Obliczanie obciążenia chłodniczego</b>                                            | <b>162</b> |
| 13.1. Strumień ciepła przenikający przez przegrodę budowlaną                             | 163        |
| 13.2. Zyski ciepła pochodzące od promieniowania słonecznego                              | 165        |
| 13.2.1. Strumień ciepła pochodzący od bezpośredniego promieniowania słonecznego          | 165        |
| 13.2.2. Strumień ciepła pochodzący od promieniowania słonecznego przekazywany przez okna | 172        |
| 13.3. Zyski ciepła pochodzące od ochładzanych towarów                                    | 176        |
| 13.4. Zyski ciepła spowodowane wentylacją                                                | 178        |
| 13.5. Zyski ciepła spowodowane infiltracją powietrza zewnętrznego                        | 179        |
| 13.6. Zyski ciepła wytwarzane przez silniki elektryczne                                  | 180        |
| 13.7. Zyski ciepła wytwarzane przez oświetlenie elektryczne                              | 181        |
| 13.8. Zyski ciepła pochodzące od ludzi                                                   | 181        |
| 13.9. Zyski ciepła utajonego spowodowane odprowadzaniem wilgoci                          | 183        |
| <b>14. Sprężarki chłodnicze</b>                                                          | <b>184</b> |
| 14.1. Sprężarki tłokowe                                                                  | 184        |
| 14.2. Sprężarki śrubowe                                                                  | 192        |
| 14.3. Sprężarki łopatkowe                                                                | 195        |
| 14.4. Sprężarki spiralne                                                                 | 196        |
| 14.5. Sprężarki odśrodkowe                                                               | 198        |
| <b>15. Wymienniki ciepła</b>                                                             | <b>205</b> |
| 15.1. Skraplacze                                                                         | 205        |
| 15.1.1. Skraplacze chłodzone wodą                                                        | 205        |

|                                                                                  |            |
|----------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 15.1.2. Skraplacze natryskowo-wyparne .....                                      | 206        |
| 15.1.3. Skraplacze chłodzone powietrzem .....                                    | 207        |
| 15.2. Parowniki .....                                                            | 209        |
| 15.2.1. Parowniki suche .....                                                    | 209        |
| 15.2.2. Parowniki zalane .....                                                   | 211        |
| 15.2.3. Parowniki mokre .....                                                    | 212        |
| 15.2.4. Wężownice chłodzące .....                                                | 214        |
| 15.3. Absorbery .....                                                            | 214        |
| 15.3.1. Absorbery zalane .....                                                   | 215        |
| 15.3.2. Absorbery z wypełnieniem .....                                           | 215        |
| 15.3.3. Absorbery zroszeniowe .....                                              | 216        |
| 15.4. Warniki .....                                                              | 216        |
| 15.5. Przegrzewacze pary .....                                                   | 218        |
| 15.6. Wodne nawilżacze powietrza .....                                           | 219        |
| 15.7. Chłodnie wieżowe wody .....                                                | 220        |
| <b>16. Agregaty skraplające i chłodnicze .....</b>                               | <b>225</b> |
| <b>17. Zasilanie parowników chłodniczych .....</b>                               | <b>228</b> |
| 17.1. Elementy rozprężne .....                                                   | 228        |
| 17.1.1. Termostatyczne zawory rozprężne .....                                    | 228        |
| 17.1.2. Automatyczne zawory rozprężne .....                                      | 232        |
| 17.1.3. Rurki kapilarne .....                                                    | 233        |
| 17.1.4. Pływakowe zawory rozprężne .....                                         | 234        |
| 17.1.5. Ręczne zawory rozprężne .....                                            | 236        |
| 17.1.6. Dobór zaworu rozprężnego .....                                           | 236        |
| 17.2. Systemy zasilania parowników .....                                         | 237        |
| 17.2.1. Zasilanie parowników suchych .....                                       | 237        |
| 17.2.2. Zasilanie oddzielaczy cieczy .....                                       | 239        |
| <b>18. Przewody chłodnicze .....</b>                                             | <b>245</b> |
| 18.1. Przewody cieczowe .....                                                    | 245        |
| 18.2. Przewody parowe .....                                                      | 246        |
| 18.3. Spadki ciśnienia w przewodach chłodniczych .....                           | 249        |
| <b>19. Przewody powietrzne .....</b>                                             | <b>257</b> |
| 19.1. Obliczanie spadku ciśnienia statycznego .....                              | 258        |
| 19.2. Wymiarowanie przewodów powietrznych .....                                  | 261        |
| 19.3. Moc napędowa wentylatora i podobieństwo dynamiczne wentylatorów .....      | 265        |
| 19.4. Optymalizacja układów rozprowadzania powietrza .....                       | 266        |
| 19.5. Rozdział powietrza w pomieszczeniach .....                                 | 269        |
| <b>20. Wykres Molliera własności powietrza wilgotnego .....</b>                  | <b>272</b> |
| 20.1. Konstrukcja wykresu Molliera $h-X$ .....                                   | 272        |
| 20.2. Charakterystyczne przemiany powietrza wilgotnego na wykresie Molliera .... | 276        |
| 20.2.1. Mieszanie strumieni powietrza wilgotnego .....                           | 276        |

|                                                                                              |            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 20.2.2. Ogrzewanie powietrza wilgotnego .....                                                | 277        |
| 20.2.3. Chłodzenie powietrza wilgotnego .....                                                | 277        |
| 20.2.4. Nawilżanie powietrza .....                                                           | 280        |
| 20.3. Obiegi klimatyzacyjne powietrza wilgotnego na wykresie Molliera .....                  | 281        |
| <b>Literatura .....</b>                                                                      | <b>284</b> |
| <b>Załącznik .....</b>                                                                       | <b>289</b> |
| 1. Własności termodynamiczne powietrza wilgotnego nasyconego .....                           | 289        |
| 2. Własności termodynamiczne czynników chłodniczych .....                                    | 294        |
| 2.1. Woda (R718) .....                                                                       | 294        |
| 2.2. Amoniak (R717) .....                                                                    | 296        |
| 2.3. Propan (R290) .....                                                                     | 299        |
| 2.4. Izobutan (R600a) .....                                                                  | 302        |
| 2.5. Dwutlenek węgla (R744) .....                                                            | 306        |
| 2.6. Czynnik R22 .....                                                                       | 309        |
| 2.7. Czynnik R23 .....                                                                       | 313        |
| 2.8. Czynnik R134a .....                                                                     | 315        |
| 2.9. Czynnik R227 .....                                                                      | 317        |
| 2.10. Czynnik R410A .....                                                                    | 321        |
| 2.11. Czynnik R507 .....                                                                     | 323        |
| 3. Roztwory stosowane w absorpcyjnych urządzeniach chłodniczych .....                        | 325        |
| 4. Wybrane zależności do obliczania własności termodynamicznych czynników chłodniczych ..... | 328        |
| <b>Skorowidz .....</b>                                                                       | <b>332</b> |