

# SPIS RZECZY

|  |           |
|--|-----------|
| Przedmowa . . . . .  | 9         |
| Wykaz ważniejszych oznaczeń . . . . .                              | 11        |
| <b>CZĘŚĆ PIERWSZA. WIADOMOŚCI PODSTAWOWE . . . . .</b>             | <b>15</b> |
| 1. Wstęp . . . . .   | 16        |
| 1.1. Istota przepływów dwufazowych . . . . .                       | 16        |
| 1.2. Przepływy dwufazowe — nowa gałąź wiedzy . . . . .             | 18        |
| 1.3. Dziedziny występowania przepływów dwufazowych . . . . .       | 19        |
| 2. Podstawowe właściwości fazy rozproszonej . . . . .              | 23        |
| 2.1. Rodzaje form fazy rozproszonej . . . . .                      | 23        |
| 2.2. Rozmiary cząstek . . . . .                                    | 25        |
| 2.3. Kształt cząstek, kropeł i pęcherzy . . . . .                  | 26        |
| 2.3.1. Kształt cząstek . . . . .                                   | 26        |
| 2.3.2. Kształt kropeł . . . . .                                    | 33        |
| 2.3.3. Kształt pęcherzy . . . . .                                  | 34        |
| 2.4. Średnie średnice . . . . .                                    | 36        |
| 2.4.1. Średnie średnice cząstek . . . . .                          | 36        |
| 2.4.2. Średnie średnice kropeł . . . . .                           | 46        |
| 2.4.3. Średnie średnice pęcherzy . . . . .                         | 47        |
| 2.5. Powierzchnia międzyfazowa . . . . .                           | 48        |
| 2.6. Udziały fazy ciągłej i rozproszonej . . . . .                 | 51        |
| 2.7. Gęstość . . . . .   | 57        |
| 2.8. Lepkość . . . . .   | 59        |
| 3. Struktura przepływów dwufazowych . . . . .                      | 67        |
| 3.1. Istota struktury przepływu dwufazowego . . . . .              | 67        |
| 3.2. Przepływ adiabatyczny w przewodzie pionowym . . . . .         | 69        |
| 3.3. Przepływ adiabatyczny w przewodzie poziomym . . . . .         | 72        |
| 3.4. Przepływ nieadiabatyczny w przewodzie pionowym . . . . .      | 75        |
| 3.5. Przepływ nieadiabatyczny w przewodzie poziomym . . . . .      | 77        |
| <b>CZĘŚĆ DRUGA. ZALEŻNOŚCI TEORETYCZNE . . . . .</b>               | <b>79</b> |
| 4. Podstawy opisu przepływów dwufazowych . . . . .                 | 80        |
| 4.1. Metody modelowania przepływów dwufazowych . . . . .           | 80        |
| 4.1.1. Uwagi wstępne . . . . .                                     | 80        |
| 4.1.2. Metoda fenomenologiczna . . . . .                           | 81        |
| 4.1.3. Metoda uśredniania . . . . .                                | 83        |
| 4.1.4. Parametry uśrednione i ich właściwości . . . . .            | 87        |
| 4.1.5. Uwagi końcowe . . . . .                                     | 97        |
| 4.2. Parametry jednowymiarowego przepływu dwufazowego . . . . .    | 98        |
| 4.3. Systematyka pionowych przepływów dwufazowych . . . . .        | 107       |
| 5. Przepływy bezpoślizgowe . . . . .                               | 110       |
| 5.1. Równania ogólne . . . . .                                     | 110       |
| 5.2. Straty ciągłe . . . . .                                       | 112       |
| 5.3. Rozprężanie mieszaniny jednorodnej gaz - faza stała . . . . . | 116       |
| 6. Przepływy z rozdzieleniem faz . . . . .                         | 121       |
| 6.1. Przepływy z częściowym rozdzieleniem faz . . . . .            | 121       |
| 6.1.1. Zależności podstawowe . . . . .                             | 121       |

|   |            |
|---|------------|
| 6.1.2. Obliczanie gradientu ciśnienia wskutek tarcia w przepływach adiabatycznych . . . . . | 122        |
| 6.1.3. Gradienty ciśnienia w przepływach nieadiabatycznych . . . . .                        | 129        |
| 6.2. Przepływy z całkowitym rozdzieleniem faz . . . . .                                     | 134        |
| 6.2.1. Szczególne przypadki przepływów . . . . .  | 134        |
| 6.2.2. Przepływy z przewagą sił bezwładności . . . . .                                      | 137        |
| 7. Przepływy z unoszeniem fazy rozproszonej . . . . .                                       | 141        |
| 7.1. Zależności podstawowe . . . . .  | 141        |
| 7.2. Przepływy z przewagą sił masowych . . . . .  | 143        |
| 7.3. Jednowymiarowe zjawiska falowe . . . . .   | 147        |
| 8. Profile prędkości i stężeń . . . . .   | 152        |
| 8.1. Rodzaje profili . . . . .  | 152        |
| 8.2. Profil krzywoliniowy pojedynczy . . . . .  | 154        |
| 8.3. Profil krzywoliniowy podwójny . . . . .  | 156        |
| <b>CZĘŚĆ TRZECIA. PRZYKŁADY RZECZYWISTYCH PRZEPLÝWÓW DWUFAZOWYCH</b>                        | <b>163</b> |
| 9. Opadanie swobodne . . . . .  | 164        |
| 9.1. Opadanie cząstek kulistych . . . . .   | 164        |
| 9.2. Początkowa faza opadania swobodnego . . . . .  | 175        |
| 9.3. Opadanie cząstek niekulistych . . . . .  | 179        |
| 9.4. Opadanie kropeł . . . . .  | 180        |
| 10. Ruch cząstek po torach krzywoliniowych . . . . .  | 185        |
| 10.1. Równanie różniczkowe ruchu cząstki w prostoliniowym polu prędkości płynu . . . . .    | 185        |
| 10.2. Przykłady ruchu cząstek w prostoliniowym polu prędkości płynu . . . . .               | 188        |
| 10.3. Równanie różniczkowe ruchu cząstki w krzywoliniowym polu prędkości płynu . . . . .    | 198        |
| 10.4. Przykłady ruchu cząstek w krzywoliniowym polu prędkości płynu . . . . .               | 200        |
| 10.4.1. Kolano . . . . .  | 200        |
| 10.4.2. Odpylacze bezwładnościowe . . . . .   | 202        |
| 10.4.3. Cyklon . . . . .  | 205        |
| 11. Sedymentacja . . . . .  | 211        |
| 11.1. Istota sedymentacji . . . . .   | 211        |
| 11.2. Model regularnego układu cząstek w zawiesinie . . . . .                               | 213        |
| 11.3. Prędkość sedymentacji . . . . .   | 219        |
| 11.4. Różne typy sedymentacji . . . . .   | 222        |
| 12. Fluidyzacja . . . . .   | 233        |
| 12.1. Wiadomości ogólne . . . . .   | 233        |
| 12.1.1. Podobieństwo warstwy fluidalnej do cieczy . . . . .                                 | 234        |
| 12.1.2. Zalety i wady fluidyzacji . . . . .   | 234        |
| 12.1.3. Zastosowanie fluidyzacji . . . . .  | 234        |
| 12.1.4. Charakterystyka warstw fluidalnych . . . . .  | 236        |
| 12.2. Prędkość początku fluidyzacji . . . . .   | 240        |
| 12.2.1. Sposoby obliczania prędkości $u_{mf}$ . . . . .                                     | 240        |
| 12.2.2. Model kapilarny . . . . .   | 240        |
| 12.2.3. Model opływowy . . . . .  | 245        |
| 12.2.4. Prędkość $u_{mf}$ dla warstw wielofrakcyjnych . . . . .                             | 247        |
| 12.3. Fluidyzacja jednorodna . . . . .  | 250        |
| 12.4. Warunki stateczności fluidyzacji jednorodnej . . . . .                                | 255        |
| 12.5. Fluidyzacja niejednorodna . . . . .   | 258        |
| 12.5.1. Klasyfikacja fazy stałej . . . . .  | 258        |
| 12.5.2. Model fluidyzacji dwufazowej . . . . .  | 260        |
| 12.5.3. Struktura fluidyzacji niejednorodnej . . . . .                                      | 261        |
| 12.5.4. Powstawanie i ruch pęcherzy . . . . .   | 263        |

|   |            |
|---|------------|
| 12.5.5. Ruch fazy stałej . . . . .                            | 269        |
| 13. Transport fazy stałej w przewodach . . . . .              | 273        |
| 13.1. Wiadomości ogólne . . . . .                             | 273        |
| 13.1.1. Ogólne informacje o transporcie fazy stałej . . . . . | 273        |
| 13.1.2. Parametry mieszaniny . . . . .                        | 275        |
| 13.1.3. Ogólne równanie oporów transportu . . . . .           | 277        |
| 13.2. Transport hydrauliczny . . . . .                        | 278        |
| 13.2.1. Przewód poziomy . . . . .                             | 279        |
| 13.2.2. Przewód pionowy . . . . .                             | 285        |
| 13.3. Transport pneumatyczny . . . . .                        | 288        |
| 13.3.1. Przewód poziomy . . . . .                             | 288        |
| 13.3.2. Przewód pionowy . . . . .                             | 291        |
| 14. Przepływ pęcherzy . . . . .                               | 293        |
| 14.1. Tworzenie się pęcherzy . . . . .                        | 293        |
| 14.1.1. Powolne tworzenie się pęcherzy . . . . .              | 293        |
| 14.1.2. Dynamiczne tworzenie się pęcherzy . . . . .           | 295        |
| 14.1.3. Częstość tworzenia się pęcherzy . . . . .             | 298        |
| 14.2. Prędkość wznoszenia się pojedynczych pęcherzy . . . . . | 300        |
| 14.3. Przepływ pęcherzykowy w przewodach . . . . .            | 306        |
| 14.4. Przepływ korkowy . . . . .                              | 308        |
| 14.4.1. Przepływ korkowy pionowy . . . . .                    | 308        |
| 14.4.2. Przepływ korkowy poziomy . . . . .                    | 308        |
| 15. Przepływ pierścieniowy . . . . .                          | 313        |
| 15.1. Ruch błony swobodnej . . . . .                          | 313        |
| 15.2. Pionowy przepływ pierścieniowy . . . . .                | 317        |
| 15.2.1. Równanie ruchu błony cieczy . . . . .                 | 318        |
| 15.2.2. Ruch przeciwpądowy . . . . .                          | 321        |
| 15.3. Poziomy przepływ pierścieniowy . . . . .                | 325        |
| 16. Ruch kropeł . . . . .                                     | 328        |
| 16.1. Uwagi ogólne . . . . .                                  | 328        |
| 16.2. Tworzenie się kropeł . . . . .                          | 328        |
| 16.3. Wtórny rozpad kropeł . . . . .                          | 333        |
| 16.4. Rozpylacze . . . . .                                    | 335        |
| <b>CZEŚĆ CZWARTA. POMIARY . . . . .</b>                       | <b>341</b> |
| 17. Pomiar fazy stałej . . . . .                              | 343        |
| 17.1. Pobieranie próbek . . . . .                             | 343        |
| 17.2. Metody analizy rozmiarów cząstek . . . . .              | 345        |
| 17.2.1. Wprowadzenie . . . . .                                | 345        |
| 17.2.2. Przesiewanie . . . . .                                | 345        |
| 17.2.3. Mikroskopia . . . . .                                 | 349        |
| 17.2.4. Sedymentacyjna analiza frakcyjna . . . . .            | 350        |
| 17.2.5. Metody segregacji przepływowej . . . . .              | 356        |
| 17.2.6. Metody wirówkowe . . . . .                            | 358        |
| 17.2.7. Metoda Coultera . . . . .                             | 360        |
| 17.3. Pomiar zapylenia w atmosferze . . . . .                 | 361        |
| 17.4. Pomiar przepływu zawiesin o małych stężeniach . . . . . | 363        |
| 17.4.1. Metody fotograficzne . . . . .                        | 363        |
| 17.4.2. Metoda rozpraszania światła . . . . .                 | 365        |
| 17.4.3. Metoda anemometrii laserowej . . . . .                | 368        |
| 17.4.4. Metoda holografii . . . . .                           | 368        |

|  |     |
|--|-----|
| 17.5. Pomiary przepływu o dużych stężeniach . . . . .              | 371 |
| 17.5.1. Metoda absorpcji światła . . . . .                         | 371 |
| 17.5.2. Metoda piezoelektryczna . . . . .                          | 373 |
| 17.5.3. Metoda wymiany ciepła . . . . .                            | 375 |
| 17.5.4. Metoda znacznika . . . . .                                 | 375 |
| 17.5.5. Sondy światłowodowe . . . . .                              | 376 |
| 17.6. Przemysłowe metody wykrywania i pomiaru cząstek . . . . .    | 377 |
| 17.6.1. Metody wykrywania przepływu . . . . .                      | 377 |
| 17.6.2. Pomiar stężenia fazy stałej . . . . .                      | 379 |
| 17.6.3. Pomiar strumienia cząstek . . . . .                        | 380 |
| 18. Pomiary kropeł . . . . .                                       | 384 |
| 18.1. Metody kontaktowe . . . . .                                  | 384 |
| 18.1.1. Metoda wyłapywania kropeł na miękką warstwę . . . . .      | 384 |
| 18.1.2. Metoda wyłapywania kropeł przez ciecz immersyjną . . . . . | 385 |
| 18.1.3. Metoda cieczy zastępczej . . . . .                         | 386 |
| 18.1.4. Metody termiczne . . . . .                                 | 387 |
| 18.1.5. Metody elektrostatyczne . . . . .                          | 387 |
| 18.1.6. Metoda segregacji grawitacyjnej . . . . .                  | 388 |
| 18.2. Metody bezkontaktowe . . . . .                               | 389 |
| 18.2.1. Metoda mikrofotografii sylwetkowej . . . . .               | 389 |
| 18.2.2. Metoda fluorescencyjna . . . . .                           | 391 |
| 18.2.3. Metoda optycznej separacji kropeł . . . . .                | 391 |
| 18.2.4. Metoda holografii . . . . .                                | 392 |
| 18.2.5. Metody optyczne . . . . .                                  | 393 |
| 19. Pomiary pęcherzy . . . . .                                     | 394 |
| 19.1. Metody fotograficzne . . . . .                               | 394 |
| 19.2. Sondy zanurzeniowe . . . . .                                 | 396 |
| 19.2.1. Sondy termoanemometryczne . . . . .                        | 396 |
| 19.2.2. Sondy optyczne . . . . .                                   | 397 |
| 19.2.3. Sondy opornościowe . . . . .                               | 398 |
| 19.2.4. Sondy pojemnościowe . . . . .                              | 400 |
| 19.2.5. Sondy światłowodowe . . . . .                              | 402 |
| 20. Pomiary struktury przepływu . . . . .                          | 404 |
| 20.1. Pomiary struktury w przewodzie . . . . .                     | 404 |
| 20.2. Pomiary błony cieczy na ścianie przewodu . . . . .           | 409 |
| Literatura . . . . .   | 415 |
| Słownik . . . . .  | 426 |
| Skorowidz . . . . .  | 427 |