

SPIS TREŚCI

WYKAZ GŁÓWNYCH OZNACZEŃ • 11

PRZEDMOWA • 13

1

PODSTAWY TERMODYNAMIKI CHEMICZNEJ PROCESÓW SPALANIA • 15

- 1.1. Podstawowe pojęcia termodynamiki 15
- 1.2. Zasady termodynamiki 16
- 1.3. Spalanie a energia 18
- 1.4. Spalanie a entropia 29
- 1.5. Dysocjacja termiczna 39
- 1.6. Ogniwa paliwowe 41
- Podsumowanie 46
- Literatura 47

2

STECHIOMETRIA PROCESÓW SPALANIA • 48

- 2.1. Stechiometria układów C-H-O-S 48
- 2.2. Ilość i skład spalin 52
- 2.3. Teoretyczne zapotrzebowanie powietrza do spalania 59
- 2.4. Temperatura spalania 60
- 2.5. Współczynnik nadmiaru powietrza 62
- 2.6. Kontrakcja 63
- Podsumowanie 64
- Literatura 64

3

PODSTAWY KINETYKI CHEMICZNEJ • 66

- 3.1. Wprowadzenie 66
- 3.2. Szybkość reakcji 67
- 3.3. Częsteczkowość i rząd reakcji 70
- 3.4. Zależność koncentracji produktów od czasu 71
- 3.5. Zależność szybkości reakcji od ciśnienia 72
- 3.6. Zależność szybkości reakcji od temperatury 74
- 3.7. Zależność szybkości reakcji od składu mieszaniny (udziału reagentów) 75
- 3.8. Reakcja dwukierunkowa 76
- 3.9. Reakcje złożone 77
- 3.10. Reakcje łańcuchowe 77
- 3.11. Kataliza. Uwagi o spalaniu katalitycznym 84
 - 3.11.1. Kataliza i katalizatory 84
 - 3.11.2. Spalanie katalityczne 85
- Podsumowanie 91
- Literatura 91

4

GAZODYNAMIKA SPALANIA • 93

- 4.1. Termo-gazodynamiczna teoria spalania 93
 - 4.1.1. Wprowadzenie 93
 - 4.1.2. Krzywa Rankine'a-Hugoniota dla spalania 94
 - 4.1.3. Detonacja 96
 - 4.1.4. Deflagracja 100
 - 4.1.5. Przejście od spalania deflagacyjnego do detonacji 100
- 4.2. Detonacja w gazach rzeczywistych 101
 - 4.2.1. Granice detonacji 101
 - 4.2.2. Stabilność i struktura detonacji 102
 - 4.2.3. Detonacja w rurze chropowatej lub z przeszkodami 106
 - 4.2.4. Detonacja spinowa 107
 - 4.2.5. Detonacja spowodowana wybuchem 108
- 4.3. Detonacja w ośrodkach dwufazowych 108
- 4.4. Uwagi o detonacji w ciałach stałych i cieczach 109
 - Podsumowanie 109
 - Literatura 110

5

ZAPŁON • 111

- 5.1. Sposoby i rodzaje zapłonu 111
- 5.2. Termiczna teoria zapłonu 112
 - 5.2.1. Teoria Semenowa; temperatura samozapłonu i granice palności mieszaniny 112
 - 5.2.2. Rozwiązanie stacjonarne. Problem masy (objętości) krytycznej 116
 - 5.2.3. Rozwiązanie niestacjonarne. Problem czasu opóźnienia samozapłonu 117
- 5.3. Chemiczna teoria zapłonu. Granice wybuchowości 119

- 5.3.1. Wprowadzenie 119
- 5.3.2. Granice wybuchowości. Półwysep zapłonu 119
- 5.3.3. Czas opóźnienia chemicznego zapłonu 122
- 5.3.4. Chemiczne aspekty samozapłonu 123
- 5.4. Teoria zapłonu iskrowego mieszanin homogenicznych 127
- 5.4.1. Wprowadzenie 127
- 5.4.2. Teoria Lewisa i von Elbego nadmiaru entalpii 129
- 5.4.3. Teoria Swetta zapłonu przepływających gazów 130
- 5.4.4. Teoria zapłonu kropel paliwa zawieszonych w powietrzu 132
- 5.5. Wyniki badań eksperymentalnych zapłonu iskrowego 135
- 5.5.1. Opis fizyczny procesu wyładowania iskrowego wg [7, 16] 135
- 5.5.2. Zapłon mieszaniny palnej od iskry zapłonowej – wczesna faza rozwoju płomienia 137
- 5.5.3. Wpływ parametrów układu zapłonowego i świecy zapłonowej na energię zapłonu 139
- 5.6. Wpływ parametrów mieszaniny palnej na energię zapłonu 141
- 5.7. Wyniki badań eksperymentalnych zapłonu iskrowego kropel paliwa 144
- 5.8. Zapłon od gorącej ścianki 147
- Podsumowanie 150
- Literatura 151

6

SPALANIE LAMINARNE • 153

- 6.1. Wprowadzenie 153
- 6.2. Teoria Mallarda i Le Chateliera 154
- 6.3. Teoria Zeldowicza-Frank-Kamienieckiego-Semenowa (Z-FK-S) 157
- 6.4. Wyniki badań eksperymentalnych 162
- 6.4.1. Mieszaniny homogeniczne 162
- 6.4.2. Mieszaniny dwufazowe (heterogeniczne) 167
- 6.5. Stateczność płomieni laminarnych 169
- 6.6. Uwagi o spalaniu laminarnym w warunkach mikrogravitacji 171
- Podsumowanie 171
- Literatura 171

7

SPALANIE TURBULENTNE • 173

- 7.1. Wprowadzenie 173
- 7.2. Podstawowe informacje na temat turbulencji 174
- 7.2.1. Stochastyczny charakter turbulencji 174
- 7.2.2. Prędkość w przepływie turbulentnym 175
- 7.2.3. Współczynniki korelacji 176
- 7.2.4. Struktura i modele turbulencji 177
- 7.2.5. Skale turbulencji 180
- 7.2.6. Spektrum energetyczne turbulencji 182
- 7.2.7. Reakcje chemiczne w przepływie turbulentnym 183
- 7.3. Spalanie turbulentne jednorodnych mieszanin gazowych 185
- 7.3.1. Modele płomieni turbulentnych 185
- 7.3.2. Współczesne teorie płomieni turbulentnych 189

- 7.4. Wyniki badań eksperymentalnych spalania turbulentnego mieszanin gazowych 191
- 7.5. Spalanie turbulentne mieszanin dwufazowych 194
 - Podsumowanie 196
 - Literatura 196

8

SPALANIE DYFUZYJNE • 198

- 8.1. Wprowadzenie 198
- 8.2. Spalanie dyfuzyjne gazów 199
 - 8.2.1. Spalanie dyfuzyjne laminarne 199
 - 8.2.2. Spalanie dyfuzyjne turbulentne 202
- 8.3. Spalanie dyfuzyjne kropeł 206
 - 8.3.1. Spalanie dyfuzyjne pojedynczej kropli w warunkach mikrogravitacji 206
 - 8.3.2. Spalanie pojedynczej kropli w warunkach konwekcji 211
 - 8.3.3. Spalanie układów i chmur kropeł 212
- 8.3.4. Wpływ widma rozpylenia na szybkość spalania strumienia kropeł 218
- 8.4. Parowanie i spalanie kropeł na gorącej ścianie 220
 - Podsumowanie 222
 - Literatura 223

9

GRANICE PALNOŚCI. WYGASZANIE PŁOMIENI • 225

- 9.1. Wprowadzenie 225
- 9.2. Granice palności 226
- 9.3. Wygaszanie płomienia 229
 - 9.3.1. Wygaszanie przez rozciąganie płomienia 229
 - 9.3.2. Wygaszanie na ścianie. Odległość wygaszania 237
 - 9.3.3. Inne rodzaje wygaszania 240
- Podsumowanie 241
- Literatura 242

10

ZJAWISKA TOWARZYSZĄCE SPALANIU PŁOMIENIOWEMU • 243

- 10.1. Wprowadzenie 243
- 10.2. Chemijonizacja 244
- 10.3. Chemiluminescencja 245
 - Podsumowanie 247
 - Literatura 247

11

SKAŻENIA ATMOSFERY PRODUKTAMI SPALANIA • 248

- 11.1. Produkty spalania szkodliwe dla środowiska naturalnego 248
- 11.2. Tlenki azotu 249
 - 11.2.1. Wpływ struktury płomienia na powstawanie tlenków azotu 249

- 11.2.2. Tlenek azotu 249
- 11.2.3. Dwutlenek azotu 254
- 11.2.4. Podtlenek azotu 255
- 11.3. Tlenek węgla 255
- 11.4. Węglowodory 256
- 11.5. Lotne związki organiczne 256
- 11.6. Tlenki siarki 256
- 11.7. Częstki stałe. Sadza 257
- 11.8. Oddziaływanie produktów spalania na atmosferę ziemską 259
- 11.8.1. Zanieczyszczenia pierwotne 259
- 11.8.2. Zanieczyszczenia wtórne 263
- Podsumowanie 267
- Literatura 268

12

SPOSOBY ZAPOBIEGANIA EMISJI ZWIĄZKÓW SZKODLIWYCH DO ATMOSFERY • 269

- 12.1. Wprowadzenie 269
- 12.2. Oddziaływanie na procesy spalania 269
- 12.2.1. Techniki czystego spalania 269
- 12.2.2. Spalanie w złożu fluidalnym 270
- 12.2.3. Spalanie bezpłomieniowe 272
- 12.2.4. Inne sposoby ograniczenia emisji NO 274
- 12.2.5. Ograniczenia emisji tlenku węgla, węglowodorów i aldehydów 279
- 12.3. Oddziaływanie na spaliny 280
- 12.4. Oddziaływanie na paliwa 280
- 12.4.1. Paliwa ekologiczne 280
- 12.4.2. Paliwa konwencjonalne 282
- Podsumowanie 283
- Literatura 283

13

ZAGADNIENIA PODOBIEŃSTWA W PROCESACH SPALANIA • 285

- 13.1. Podstawowe informacje z teorii podobieństwa 285
- 13.2. Podobieństwo fizyczne 286
- 13.2.1. Podobieństwo przepływów 286
- 13.2.2. Podobieństwo zjawisk wymiany ciepła i masy 287
- 13.3. Podobieństwo zjawisk z zakresu termodynamiki chemicznej 288
- 13.4. Uwagi o modelowaniu procesów spalania 289
- Podsumowanie 290
- Literatura 291

DODATKI

DODATEK A

LICZBA POSTĘPU REAKCJI • 295

DODATEK B

NIEKTÓRE STAŁE FIZYCZNE • 296

DODATEK C

MIESZANINY GAZÓW • 299

DODATEK D

ALGORYTMY I TABLICA DO OBLICZANIA CIEPŁA WŁAŚCIWEGO, ENTALPII
I ENTROPII NIEKTÓRYCH GAZÓW • 303

DODATEK E

TABLICE WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI TERMOCHEMICZNYCH,
TERMODYNAMICZNYCH I TERMOFIZYCZNYCH NIEKTÓRYCH PALIW • 306

SKOROWIDZ • 324