

Spis treści

Przedmowa.	11
CZĘŚĆ PIERWSZA	
Teoria procesów przepływowych.	13
Wykaz ważniejszych symboli	
1. Podstawy mechaniki płynów	17
1.1. Pojęcia podstawowe	17
1.1.1. Koncepcja ośrodka ciągłego (kontinuum).	17
1.1.2. Pola fizyczne	17
1.1.3. Strumienie i ich gęstości średnie i punktowe	18
1.1.4. Ciało i jego otoczenie	20
1.1.5. Siły w ośrodku ciągłym	20
1.1.6. Warunki równowagi sił, druga zasada Newtona	23
1.1.7. Pierwsza zasada termodynamiki	24
1.2. Naprężenia w ośrodku ciągłym	24
1.2.1. Wektor naprężenia	24
1.2.2. Tensor naprężenia	28
1.2.3. Symetria tensora naprężenia	33
1.2.4. Ciśnienie izotropowe. Dewiator tensora naprężenia	34
1.3. Kinematyka ośrodka ciągłego	35
1.3.1. Metody analizy ruchu	35
1.3.2. Pochodna wędrowna	37
1.3.3. Linie prądu	38
1.3.4. Gradient prędkości	39
1.3.5. Tensor szybkości odkształcenia i tensor szybkości obrotu	40
1.4. Różniczkowe równania bilansu masy, pędu i energii	43
1.4.1. Różniczkowe równanie bilansu masy (równanie ciągłości)	43
1.4.2. Różniczkowe równanie bilansu pędu (równanie ruchu)	45
1.4.3. Różniczkowe równanie bilansu energii	47
2. Mechanika płynów nieściśliwych w przepływach izotermicznych	51
2.1. Elementy reologii płynów	51
2.1.1. Reologiczne równania stanu (równania konstytutywne)	51
2.1.1.1. Ogólne zasady formułowania reologicznych równań stanu	51
2.1.1.2. Koncepcja materiałów prostych z zanikającą pamięcią	52
2.1.1.3. Najprostsze aproksymacje reologicznego równania stanu dla płynów prostych z zanikającą pamięcią	52
2.1.2. Proste przypadki przepływu	54
2.1.2.1. Prosty przepływ ścinający	54
2.1.2.2. Prosty przepływ rozciągający	59
2.2. Przepływ płynu doskonałego. Elementy statyki płynów	63

2.2.1.	Równanie Eulera	63
2.2.2.	Przepływ potencjalny. Równanie Bernoullego jako całka równania Eulera	63
2.2.3.	Równanie Bernoullego jako całka różniczkowych równań energii	65
2.2.4.	Płaski przepływ potencjalny	66
2.2.4.1.	Potencjał zespolony	66
2.2.4.2.	Optyw potencjalny koła na płaszczyźnie	69
2.2.5.	Elementy statyki płynów	72
2.3.	Przepływ lepkiego płynu niutonowskiego	75
2.3.1.	Równanie Naviera-Stokesa dla płynu nieściśliwego	75
2.3.2.	Całki równań Naviera-Stokesa	78
2.3.2.1.	Przepływy Poiseuille'a (przepływy ciśnieniowe)	79
2.3.2.2.	Przepływy Couette'a (przepływy wleczone)	85
3.	Przepływy rzeczywiste	90
3.1.	Wiadomości podstawowe	90
3.1.1.	Wprowadzenie	90
3.1.2.	Dane doświadczalne dotyczące spadku ciśnienia przy przepływie płynów przez przewody. Doświadczenie Reynoldsa	90
3.1.3.	Krytyczna wartość liczby Reynoldsa	93
3.1.4.	Zastępcza liczba Reynoldsa dla przewodów o przekroju niekołowym	93
3.1.5.	Przepływ płynu wzdłuż płaskiej płyty i w odcinku wlotowym rury	93
3.1.6.	Lepkość płynu niutonowskiego	96
3.1.6.1.	Definicja lepkości	96
3.1.6.2.	Naprężenie styczne jako lepki strumień pędu w kierunku prostopadłym do kierunku przepływu	97
3.1.7.	Płyny nieniuonowskie	98
3.1.7.1.	Koncepcja uogólnionych płynów niutonowskich	99
3.1.7.2.	Efekty pamięci płynu	100
3.2.	Podobieństwo zjawisk fizycznych i analiza wymiarowa	101
3.2.1.	Teoria podobieństwa	101
3.2.2.	Analiza inspekcyjna równań różniczkowych	103
3.2.3.	Analiza wymiarowa	104
3.2.3.1.	Metoda Rayleigha	104
3.2.3.2.	Metoda Buckinghama	105
3.2.4.	Przykład zastosowania analizy wymiarowej. Opory przepływu płynu niutonowskiego przez przewód cylindryczny	106
3.3.	Przepływ przez przewody	110
3.3.1.	Rozkład naprężenia stycznego przy przepływie przez rurę	110
3.3.2.	Przepływ laminarny przez przewody	111
3.3.2.1.	Ogólne równanie przepływu w rurze (równanie Rabinowitscha-Mooneya-Schofielda)	111
3.3.2.2.	Laminarny przepływ płynów niutonowskich przez przewody o przekroju niekołowym	114
3.3.2.3.	Współczynnik oporów przepływu w ruchu laminarnym	115
3.3.2.4.	Rozkład prędkości przy przepływie laminarnym płynu potęgowego Ostwalda-de Waele	119
3.3.3.	Przepływ turbulentny przez przewody	120
3.3.3.1.	Dane doświadczalne dotyczące przepływu turbulentnego płynów niutonowskich	120
3.3.3.2.	Uniwersalny profil prędkości	123
3.3.3.3.	Związek między oporami przepływu i rozkładem prędkości w ruchu turbulentnym	125
3.3.3.4.	Opory przepływu przez rury szorstkie	127
3.4.	Warstwa graniczna	128
3.4.1.	Wprowadzenie	128
3.4.2.	Równania warstwy granicznej Prandtla	129
3.4.3.	Laminarna warstwa graniczna na płycie płaskiej	131
3.4.4.	Turbulentna warstwa graniczna na płycie płaskiej	134
3.4.5.	Grubość przemieszczenia	135
3.4.6.	Oderwanie warstwy granicznej	136
3.4.7.	Optyw podkrytyczny i nadkrytyczny	138
3.5.	Turbulencja	139
3.5.1.	Wprowadzenie	139
3.5.2.	Rodzaje przepływów turbulentnych	140
3.5.3.	Pomiary turbulencji	141
3.5.4.	Ruch turbulentny średnio ustalony	142
3.5.5.	Naprężenia Reynoldsa	144
3.5.6.	Lepkość wirowa	147
3.5.7.	Teoria długości drogi mieszania	148
3.5.8.	Rozkład prędkości przy przepływie turbulentnym przez przewód cylindryczny	150

3.5.9.	Elementy statystycznej teorii turbulencji	152
3.5.9.1.	Intensywność turbulencji	152
3.5.9.2.	Współczynnik korelacji i skala turbulencji	154
3.5.9.3.	Widmo energii kinetycznej turbulencji	155
3.6.	Przepływ laminarny przez warstwy ziarniste	155
3.6.1.	Uwagi wstępne	155
3.6.2.	Model kapilarny warstwy ziarnistej Kozeny'ego-Carmana	156
3.6.3.	Przepływ laminarny	158
3.6.3.1.	Płyn niutonowski	159
3.6.3.2.	Płyn potęgowy	160
3.7.	Przepływ dwufazowy gaz-ciecz w przewodzie poziomym	161
3.7.1.	Wprowadzenie	161
3.7.2.	Opory przepływu przez przewody układu dwufazowego gaz-ciecz niutonowska	165
3.7.3.	Opory przepływu przez przewody układu dwufazowego gaz-lepka ciecz nieniu-tonowska	168
3.8.	Rozkład czasu przebywania	171
3.8.1.	Wprowadzenie	171
3.8.2.	Dystrybucja czasu przebywania (funkcja F)	171
3.8.3.	Widmo czasu przebywania (funkcja E)	172
3.8.4.	Wykorzystanie momentów do charakteryzowania rozkładu czasu przebywania	174
3.8.5.	Funkcje rozkładu dla idealnych przypadków przepływu płynu	176
3.8.6.	Funkcja rozkładu dla przepływu laminarnego w przewodzie cylindrycznym	177
3.8.7.	Funkcje rozkładu dla układów rzeczywistych	179
	Literatura uzupełniająca	181

CZĘŚĆ DRUGA

Teoria procesów cieplnych 183

Wykaz ważniejszych symboli

4.	Pojęcia podstawowe	186
4.1.	Rodzaje ruchu ciepła	186
4.2.	Przenikanie ciepła	188
4.3.	Opory cieplne	190
5.	Pojęcia podstawowe dotyczące przewodzenia ciepła	192
5.1.	Pole i gradient temperatury w ciele przewodzącym ciepło	192
5.2.	Równanie różniczkowe przewodzenia ciepła	194
5.3.	Warunki jednoznaczności dla przewodzenia ciepła	197
5.4.	Przewodnictwo cieplne materiałów	199
5.5.	Hiperboliczne równanie różniczkowe przewodzenia ciepła	201
6.	Przewodzenie ciepła w warunkach ustalonych	204
6.1.	Przewodzenie ciepła przez ściankę płaską	204
6.2.	Wpływ zmiennej wartości współczynnika przewodzenia ciepła	208
6.3.	Przewodzenie ciepła przez ściankę cylindryczną	210
6.4.	Krytyczna średnica ścianki cylindrycznej	215
6.5.	Przewodzenie ciepła przez ściankę kulistą	217
6.6.	Przewodzenie ciepła z wewnętrznymi źródłami ciepła	218
6.7.	Intensyfikacja ruchu ciepła	224
6.7.1.	Intensyfikacja przez zwiększenie współczynnika wnikania ciepła	224
6.7.2.	Powierzchnie ożebrowane	225
6.8.	Chłodzenie płyty porowatej	231
7.	Przewodzenie ciepła w warunkach nieustalonych	235
7.1.	Wprowadzenie	235
7.2.	Chłodzenie lub ogrzewanie płyty płaskiej	236
7.2.1.	Rozwiązanie analityczne równania różniczkowego przewodzenia ciepła	237

7.2.2.	Analiza rozwiązywania równania różniczkowego przewodzenia ciepła w nieskończonej płycie płaskiej	241
7.2.3.	Wyznaczenie ilości ciepła traconego przez płytę podczas chłodzenia	247
7.3.	Chłodzenie lub ogrzewanie cylindra nieskończonego	249
7.4.	Chłodzenie lub ogrzewanie kuli	250
7.5.	Chłodzenie lub ogrzewanie ciał skończonych	252
7.6.	Zależność chłodzenia i ogrzewania od kształtu i wymiarów ciała	252
8.	Metody przybliżone i analogowe rozwiązywania zagadnień przewodzenia ciepła	254
8.1.	Wprowadzenie	254
8.2.	Metody przybliżone	254
8.3.	Metody analogowe	260
9.	Podstawy ruchu ciepła przez wnikanie	262
9.1.	Wprowadzenie	262
9.2.	Równanie różniczkowe ruchu ciepła (równanie energii)	263
9.3.	Termiczna warstwa graniczna	267
9.4.	Równanie energii laminarnej warstwy granicznej	268
9.5.	Równanie całkowite energii laminarnej warstwy granicznej	269
9.6.	Równania ruchu i energii turbulentnej warstwy granicznej	270
9.7.	Parametry podobieństwa w ruchu ciepła	273
10.	Zastosowanie teorii warstwy granicznej do zagadnień ruchu ciepła przez wnikanie	277
10.1.	Wprowadzenie	277
10.2.	Rozwiązanie równania energii laminarnej warstwy granicznej na płycie płaskiej	278
10.3.	Rozwiązanie przybliżone	280
10.4.	Turbulentna warstwa graniczna na płycie płaskiej	284
10.5.	Ruch ciepła w turbulentnej warstwie granicznej na płycie płaskiej	285
10.6.	Analogia między ruchem ciepła i pędu	287
10.6.1.	Analogia Reynoldsa	287
10.6.2.	Analogia Prandtla	289
10.7.	Ruch ciepła podczas przepływu płynu w rurach	293
10.7.1.	Przepływ nieizotermiczny	293
10.7.2.	Ruch ciepła podczas w pełni rozwiniętego przepływu w rurze	294
11.	Korelacje doświadczalne i praktyczne dla ruchu ciepła podczas konwekcji wymuszonej	297
11.1.	Wprowadzenie	297
11.2.	Konwekcja wymuszona podczas opływu płyty płaskiej	298
11.3.	Konwekcja wymuszona podczas opływu ciał dwuwymiarowych	301
11.4.	Konwekcja wymuszona w przewodach cylindrycznych	305
12.	Ruch ciepła podczas konwekcji swobodnej	309
12.1.	Wprowadzenie	309
12.2.	Podstawowe równania opisujące konwekcję swobodną otrzymane analitycznie	309
12.3.	Korelacje doświadczalne do obliczania ruchu ciepła podczas konwekcji swobodnej	312
12.4.	Ruch ciepła podczas konwekcji swobodnej w przestrzeni ograniczonej	315

13.	Ruch ciepła przy kondensacji i wrzeniu	317
13.1.	Wprowadzenie	317
13.2.	Uwagi ogólne dotyczące procesu kondensacji	317
13.3.	Kondensacja błonkowa na powierzchni pionowej	318
13.4.	Kondensacja wewnątrz rur	325
13.5.	Kondensacja na zewnątrz rur poziomych	325
13.6.	Mechanizm ruchu ciepła w procesie wrzenia	326
13.7.	Zależność wnikania ciepła podczas wrzenia od różnicy temperatur	329
13.8.	Współczynnik wnikania ciepła przy wrzeniu	331
14.	Ruch ciepła przez promieniowanie	333
14.1.	Wprowadzenie	333
14.2.	Podstawowe prawa promieniowania cieplnego	334
14.3.	Rozkład energii w zależności od kierunku promieniowania	338
14.4.	Wymiana ciepła przez promieniowanie między powierzchniami równoległymi	340
14.5.	Wymiana ciepła przez promieniowanie między dwiema powierzchniami w obszarze zamkniętym	341
14.6.	Działanie ekranów	343
14.7.	Promieniowanie gazów	344
15.	Elementy obliczania wymienników ciepła	347
15.1.	Wprowadzenie	347
15.2.	Podstawowe równania obliczeniowe	348
15.3.	Współczynnik przenikania ciepła w wymiennikach	352
15.4.	Średnia różnica temperatur	353
15.5.	Koncepcja liczby jednostek przenikania (L_fP)	359
15.6.	Wyznaczanie charakterystyki danego wymiennika ciepła	363
15.7.	Obliczanie temperatury powierzchni wymiany ciepła	365
	Literatura uzupełniająca	367

CZĘŚĆ TRZECIA

Teoria procesów dyfuzyjnych 369

Wykaz ważniejszych symboli

16.	Dyfuzja ustalona	373
16.1.	Wstęp	373
16.2.	Strumień dyfundującej masy	374
16.3.	Szybkość dyfuzji w układach wieloskładnikowych	375
16.3.1.	Ustalona dyfuzja dwukierunkowa równomolowa	377
16.3.2.	Ustalona dyfuzja dwukierunkowa nierównomolowa	378
16.3.3.	Ustalona dyfuzja składnika A przez składnik inertyny B	379
16.3.4.	Ustalona dyfuzja składnika A przez mieszaninę składników inertynych	381
16.3.5.	Ustalona dyfuzja wieloskładnikowa	382
17.	Współczynniki dyfuzji	384
17.1.	Wprowadzenie	384
17.2.	Współczynniki dyfuzji w fazie gazowej	384
17.3.	Współczynniki dyfuzji w fazie ciekłej	389
17.4.	Współczynniki dyfuzji w elektrolitach	391
17.5.	Współczynniki dyfuzji w fazie stałej	392

18.	Różniczkowy bilans masy	394
18.1.	Wyprowadzenie różniczkowego bilansu masy	394
18.2.	Rozwiązania różniczkowego bilansu masy	400
18.2.1.	Dyfuzja nieustalona w fazie gazowej	400
18.2.2.	Ustalona wnikanie masy podczas spływu cieczy ruchem laminarnym po ścianie pionowej	404
18.2.3.	Szybkość rozpuszczania pionowej płyty podczas laminarnego spływu cieczy	406
18.2.4.	Wnikanie masy od płyty płaskiej przy stabilizującym się rozkładzie prędkości	407
18.2.5.	Szybkość dyfuzji podczas laminarnego przepływu płynu w rurze	412
18.2.6.	Wymiana masy od płyty pionowej podczas konwekcji swobodnej	413
18.2.7.	Dyfuzja nieustalona do wnętrza kuli	413
18.2.8.	Dyfuzja ustalona od kuli do otoczenia	417
18.3.	Numeryczne rozwiązania równania dyfuzji	420
19.	Wnikanie masy w ruchu turbulentnym	422
19.1.	Równanie różniczkowe bilansu masy w ruchu turbulentnym	422
19.2.	Współczynnik wnikania masy. Modele procesu wnikania masy	425
19.3.	Objętościowy współczynnik wnikania masy	430
19.4.	Zastosowanie teorii podobieństwa w procesie wnikania masy	431
19.5.	Zastosowanie metody całkowitej do wyznaczania współczynników wnikania masy	433
19.6.	Współczynnik przenikania masy	436
20.	Współczynnik wnikania masy.	440
20.1.	Wyznaczanie współczynników wnikania masy w fazie gazowej	440
20.2.	Wyznaczanie współczynników wnikania masy w fazie ciekłej	441
20.3.	Ważniejsze równania wnikania masy	441
20.3.1.	Wnikanie masy w kolumnach o ściankach zraszanych	441
20.3.2.	Wnikanie masy w kolumnach wypełnionych	444
20.3.3.	Wnikanie masy w kolumnie sitowej bezprzelewowej	446
20.3.4.	Wnikanie masy w kolumnach rozpryskowych	448
20.4.	Wpływ napięcia powierzchniowego na szybkość wnikania masy	451
21.	Analogie przenoszenia pędu, ciepła i masy.	454
22.	Podstawy obliczeń wymienników masy	460
22.1.	Wprowadzenie	460
22.2.	Podstawowe procesy przenoszenia masy	460
22.3.	Wymiennik masy o działaniu okresowym	462
22.4.	Wymiennik masy z ciągłym doprowadzaniem (odprowadzaniem) jednej fazy	463
22.5.	Wymiennik masy z ciągłym przepływem tylko jednej fazy	464
22.6.	Wymienniki masy z ciągłym przepływem jednej fazy i powstawaniem fazy drugiej	465
22.7.	Wymienniki o działaniu ciągłym	465
22.7.1.	Bilans dwukierunkowego równomolowego procesu wymiany masy	466
22.7.2.	Obliczenie powierzchni wymiany masy dla procesu przenikania masy dwukierunkowego równomolowego	467
22.7.3.	Bilans jednokierunkowego procesu wymiany masy w kolumnie przeciwpądowej	469
22.7.4.	Obliczenie powierzchni wymiany masy dla jednokierunkowego przenikania masy	470
22.7.5.	Bilanse jednokierunkowego procesu wymiany masy w kolumnie współpądowej	473
22.7.6.	Obliczenie powierzchni wymiany masy w przypadku kolumn półkowych	474
23.	Jednoczesny ruch ciepła i masy	477
23.1.	Wprowadzenie	477
23.2.	Wpływ ruchu masy na wartość współczynnika wnikania ciepła w ruchu turbulentnym	477

23.3.	Operacje woda-powietrze	478
23.3.1.	Parametry powietrza wilgotnego	479
23.3.2.	Równanie psychrometru	480
23.3.3.	Proces adiabaticznego nasycania powietrza	482
23.3.4.	Zasady obliczania wymiennika masy dla procesu przebiegającego w układzie woda-powietrze	484
23.4.	Nieadiabaticzny proces absorpcji	490

24. Ruch masy z reakcją chemiczną 496

24.1.	Wprowadzenie	496
24.2.	Ruch masy z reakcją chemiczną w płynie nieruchomym	498
24.3.	Absorpcja z nieskończenie szybką reakcją chemiczną w płynie nieruchomym	499
24.4.	Turbulentny ruch masy z reakcją chemiczną	504
24.4.1.	Wprowadzenie	504
24.4.2.	Reakcja pseudopierwszego rzędu w filmie cieczy	504
24.4.3.	Reakcja natychmiastowa w fazie ciekłej	506
24.4.4.	Reakcje drugiego rzędu	508
24.5.	Podstawy obliczeń wymienników masy, w których zachodzi reakcja chemiczna	510
24.5.1.	Wprowadzenie	510
24.5.2.	Metody obliczeń absorbera barbotażowego o działaniu ciągłym	510
24.5.3.	Metoda obliczeń absorbera barbotażowego o działaniu okresowym	513
24.5.4.	Metody obliczeń procesów wnikania masy z reakcją chemiczną w kolumnach wypełnionych	514
	Literatura uzupełniająca	516
	Skorowidz rzeczowy	517