

Spis treści

PRZEDMOWA	11
WYKAZ OZNACZEŃ	12
WPROWADZENIE	18
1. PODSTAWOWE POJĘCIA I PRAWA PRZEWODZENIA CIEPŁA	20
1.1. Pole temperatury, prawo Fouriera	20
1.2. Przewodność cieplna	22
1.3. Równanie różniczkowe nieustalonego przewodzenia ciepła	26
1.4. Warunki początkowe i brzegowe	30
1.5. Bezwymiarowa forma równania przewodzenia ciepła	32
2. JEDNOWYMIAROWE USTALONE PRZEWODZENIE I PRZENIKANIE CIEPŁA	35
2.1. Przegroda płaska	35
2.1.1. Zastępczy współczynnik przewodzenia ciepła	39
2.2. Przegroda cylindryczna	41
Odnoszenie k_l na powierzchnię płaską A_l	44
2.2.1. Krytyczna i ekonomiczna grubość izolacji	45
2.3. Przegroda kulista	47
2.4. Jednowymiarowe przewodzenie ciepła dla λ zależnego od temperatury	49
2.5. Przenikanie ciepła przez przegrodę dowolną	51
2.6. Współczynnik przenikania ciepła	52
2.6.1. Opory zanieczyszczeń (osadu)	52
2.6.2. Zwiększenie współczynnika przenikania ciepła przez rozwinięcie powierzchni	53
3. PRZEWODZENIE CIEPŁA W PRĘTACH I ŻEBRACH, PRZEGRODY OŻEBROWANE	55
3.1. Pręt lub żebro o stałym przekroju	55
3.1.1. Przypadki szczególne	57
Pręt nieskończenie długi	57
Pręt o skończonej długości L nie zaizolowany na końcu	57
Pręt o skończonej długości zaizolowany na końcu	58
Przedłużanie żebra lub pręta, tulejka termometryczna	58
3.2. Pręty lub żebra o zmiennym przekroju	59
3.2.1. Okrągłe żebro płaskie (pierścien o stałej grubości)	60
3.2.2. Żebro proste o profilu trójkątnym	62

3.2.3. Żebro proste lub pręt o profilu dowolnym	64
3.3. Sprawność żebra	65
3.3.1. Efektywność żebra	68
3.4. Optymalizacja żeber	70
3.5. Przenikanie ciepła przez przegrodę ożebrowaną	73
3.6. Płyty grzejne	75
3.7. Ścianka ożebrowana	80
4. WYBRANE ZAGADNIENIA USTALONEGO PRZEWODZENIA CIEPŁA	82
4.1. Ustalone przewodzenie ciepła przy istnieniu wewnętrznych źródeł ciepła	82
4.1.1. Płaska płyta o nieograniczonych rozmiarach	83
4.1.2. Walec o promieniu R	84
4.2. Dwuwymiarowe (płaskie) bezźródłowe ustalone pole temperatury ..	85
4.2.1. Metoda rozdzielania zmiennych	85
4.2.2. Metoda źródeł i upustów	90
4.2.3. Metoda graficzna	93
4.2.4. Metody analogowe	96
4.2.5. Naroża	97
5. NIEUSTALONE PRZEWODZENIE CIEPŁA	98
5.1. Nieustalone przewodzenie ciepła w nieskończonej płycie przy skokowej zmianie temperatury ośrodka	98
5.1.1. Rozwiązanie dla początkowego liniowego rozkładu temperatury	105
5.2. Przewodzenie nieustalone w nieskończonym walcu	106
5.3. Nieustalone nagrzewanie lub ochładzanie kuli o promieniu r_0	109
5.4. Nieustalone przewodzenie ciepła w ciele półnieskończonym	110
5.5. Systemy wielowymiarowe	114
5.6. Stan uporządkowany przewodzenia ciepła	116
5.7. Ochładzanie lub ogrzewanie ciała o małym oporze cieplnym	117
5.8. Nieustalone przewodzenie ciepła przy zmiennej temperaturze ośrodka	118
5.8.1. Płaska płyta, liniowa zmiana temperatury ośrodka	119
5.8.2. Przewodzenie ciepła w ciele półnieskończonym przy okresowej zmianie temperatury powierzchni	120
5.9. Przewodzenie ciepła przy zmianie stanu skupienia ciała stałego ..	122
5.9.1. Rozwiązanie uproszczone dla krzepnięcia cieczy	125
5.10. Inne metody analityczne rozwiązywania zagadnień nieustalonego przewodzenia ciepła	125

6. NUMERYCZNE METODY ROZWIĄZYWANIA ZAGADNIEŃ PRZEWODZENIA CIEPŁA	126
6.1. Jednowymiarowe nieustalone przewodzenie ciepła	127
6.2. Metoda bilansów elementarnych	130
6.2.1. Równania różnicowe dla warstw niejednorodnych	131
Węzły przypowierzchniowe	131
Warstwy niejednorodne	133
Węzły w pobliżu płaszczyzn symetrii	134
6.2.2. Zagadnienia wielowymiarowe	134
Elementy różnicowe w różnych układach współrzędnych	136
6.2.3. Brzeg obszaru	138
Węzeł na brzegu zakrzywionym	138
Węzły nie leżące na brzegu obszaru	138
6.2.4. Tok postępowania w metodzie jawnej	139
6.3. Metoda Cranka–Nicolsona — ujęcie bilansowe	140
6.4. Ograniczenie długości kroku czasowego w metodzie różnic skończonych	144
6.4.1. Metoda różnic skończonych — schemat ogólny	145
Stabilność rozwiązania i ograniczenia kroku czasowego	146
Interpretacja czynnika w	148
6.5. Ustalone przewodzenie ciepła (pole bez źródeł ciepła)	149
6.5.1. Rozwiązywanie układu równań liniowych	151
6.5.2. Metoda Monte Carlo	153
Uwzględnienie źródeł ciepła	154
6.6. Metody analogowe rozwiązywania zagadnień przewodzenia ciepła	154
7. KONWEKcja	156
7.1. Podstawowe równania przejmowania ciepła	157
7.1.1. Równanie wymiany ciepła	157
7.1.2. Równanie przewodzenia ciepła	158
7.1.3. Równanie ruchu płynu	158
7.1.4. Równanie ciągłości strugi	161
7.2. Wpływ burzliwości na postać równań	162
7.3. Warunki jednoznaczności	163
7.4. Teoria podobieństwa	163
7.4.1. Twierdzenia teorii podobieństwa	168
7.5. Analiza wymiarowa	169
7.6. Średnia temperatura płynu	171
7.7. Średnica ekwiwalentna	172

8. KONWEKCJA WYMUSZONA	173
8.1. Wnikanie ciepła podczas przepływu wzdłuż płaskiej płyty	173
8.1.1. Przepływ laminarny — rozwiązanie ścisłe	174
8.1.2. Przepływ laminarny — rozwiązanie przybliżone	177
8.1.3. Wzory robocze do obliczania współczynnika α	178
8.1.4. Związek pomiędzy wymianą ciepła a oporami przepływu (analogia Colburna)	179
8.2. Wnikanie ciepła podczas poprzecznego opływu walca	181
8.2.1. Opływ kuli i walców niekołowych	184
8.2.2. Konwekcja podczas poprzecznego opływu pęczków rur	185
8.2.3. Opływ żeber i rur ożebrowanych	187
8.3. Grawitacyjny spływ cieczy	189
8.4. Wnikanie ciepła podczas wymuszonego przepływu płynu w przewodach	192
8.4.1. Przepływ laminarny w prostej rurze	192
Rozwiązanie dla stałego strumienia ciepła na ścianie	194
Rozwiązanie dla stałej temperatury ścianki	195
8.4.2. Przepływ turbulentny w prostej rurze	199
Uprozczone równanie wielkościowe dla przepływu płynu w rurze	202
8.4.3. Przepływ przejściowy	202
8.4.4. Wpływy uboczne	204
Kierunek przepływu ciepła	204
Odcinek rozbiegowy	204
Wpływ krzywizny kanału	205
Kanał o przekroju niekołowym	206
8.5. Konwekcja w ciekłych metalach	206
9. KONWEKCJA SWOBODNA	208
9.1. Rozwiązanie analityczne	209
9.1.1. Rozwiązanie ścisłe dla pionowej ścianki płaskiej w przestrzeni nieograniczonej	209
9.1.2. Rozwiązanie przybliżone dla pionowej ścianki płaskiej	211
9.2. Zależności empiryczne dla konwekcji swobodnej	214
9.2.1. Zależności empiryczne w przypadku stałego strumienia ciepła	215
9.2.2. Wzory uproszczone	216
9.3. Konwekcja swobodna w przestrzeni ograniczonej i zamkniętej ...	216
9.4. Równoczesna konwekcja swobodna i wymuszona	218

10. KONWEKCJA PRZY ZMIANIE STANU SKUPIENIA	219
10.1. Wymiana ciepła podczas skraplania par	220
10.1.1. Skraplanie pary na ścianie pionowej i pochyłej	222
Turbulentny spływ kondensatu	224
10.1.2. Skraplanie pary na rurze poziomej	225
10.1.3. Inne czynniki wpływające na α podczas skraplania par	227
Wpływ prędkości pary	227
Skraplanie pary przegrzanej	228
Skraplanie wewnątrz rur poziomych	229
Skraplanie w obecności gazu obojętnego	231
10.1.4. Kondensacja kropłowa	232
10.2. Wrzenie cieczy	233
10.2.1. Powstawanie i wzrost pęcherzyków pary	237
10.2.2. Wyniki badań i zależności kryterialne	239
Swobodne wrzenie pęcherzykowe	239
Wzory uproszczone dla wrzenia pęcherzykowego	241
Krytyczny strumień ciepła	242
10.2.3. Wrzenie błonowe	243
10.2.4. Wrzenie podczas konwekcji wymuszonej	244
11. PROMIENIOWANIE CIEPLNE.	247
11.1. Podstawowe pojęcia i prawa promieniowania	248
11.1.1. Prawo Kirchhoffa	250
11.1.2. Podstawowe pojęcia	251
11.1.3. Prawo Lamberta	253
11.1.4. Prawo Plancka	255
11.1.5. Prawo Wiena	257
11.1.6. Prawo Stefana – Boltzmanna	258
11.1.7. Funkcja promieniowania	260
11.2. Emisyjność ciał	262
11.3. Radiacyjna wymiana ciepła w ośrodku diatermicznym	265
11.3.1. Emisja własna, jasność, opromienianie	265
11.3.2. Stosunek konfiguracji	266
Obliczanie stosunku konfiguracji — wzór ogólny	267
Metoda optyczna wyznaczania stosunków konfiguracji	269
Metoda nitkowa	270
Algebra stosunków konfiguracji	271
11.3.3. Wymiana ciepła przez promieniowanie pomiędzy dwiema równoległymi, płaskimi powierzchniami.	272

Metoda wielokrotnych odbić	272
Metoda jasności	274
11.3.4. Wymiana ciepła między dwiema powierzchniami zamykającymi przestrzeń, z których jedna jest niewklęsła	275
Zastąpienie powierzchni wklęsłej płaską obwiednią	277
11.3.5. Radiacyjna wymiana ciepła w układzie wielopowierzchniowym	278
Układ trójpowierzchniowy zamknięty z powierzchnią 3 wklęsłą	279
Układ dwupowierzchniowy otwarty	282
11.3.6. Analogia elektryczna	283
11.3.7. Działanie ekranów	285
11.4. Radiacyjny współczynnik wnikania ciepła	286
12. PROMIENIOWANIE SUBSTANCJI CZĘŚCIOWO PRZEZROCZYSTYCH	288
12.1. Absorpcyjność, emisyjność i transmisyjność substancji częściowo przezroczystych	288
Promieniowanie objętościowe	291
12.2. Zastępcza grubość warstwy gazu promieniującego	291
12.3. Równanie transportu energii promienistej	293
12.4. Promieniowanie gazów technicznych	296
12.4.1. Emisyjność i absorpcyjność CO_2 i H_2O	297
Modele gazu promieniującego, absorpcyjność CO_2 i H_2O ...	299
12.4.2. Emisyjność cząstek stałych zawartych w gazie	301
Emisyjność sadzy	302
Emisyjność płomienia	304
12.4.3. Emisyjność i absorpcyjność spalin	305
Wzory przybliżone	305
Absorpcyjność gazu nieszarego	309
Spaliny zapyłone lub zawierające sadzę	310
12.5. Model pasmowy promieniowania gazów	311
12.5.1. Model pasm szerokich Edwardsa – Balakrishnana	312
Określenie emisyjności gazu	317
12.6. Zastępczy gaz realny	318
13. WYMIANA CIEPŁA W PRZESTRZENI WYPEŁNIONEJ GAZEM PROMIENIUJĄCYM	321
13.1. Przepływ ciepła pomiędzy gazem promieniującym a ścianką	321
13.1.1. Porównanie rozwiązań: gaz szary – gaz nieszary	323
13.2. System wielopowierzchniowy wypełniony gazem o wyrównanej temperaturze	324

13.2.1. Układ dwupowierzchniowy zamknięty z gazem szarym w środku	326
Analiza radiacyjnej wymiany ciepła	327
13.3. Radiacyjny przepływ ciepła w ośrodku nieizotermicznym	331
13.3.1. Powierzchnie wzajemnej wymiany ciepła	333
13.3.2. Metoda podziału strefowego	336
13.4. Model pasmowy radiacyjnej wymiany ciepła dla gazów	338
13.4.1. Przykład zastosowania modelu pasmowego do obliczania radiacyjnej wymiany ciepła	340
14. WYMIENNIKI CIEPŁA	344
14.1. Rekuperatory współprądowe i przeciwprądowe	345
14.1.1. Rozkład temperatur czynników	346
Współprąd	346
Przeciwprąd	347
Skraplacz i parowacz	348
Zależności bezwymiarowe	349
Wielkości graniczne	350
14.1.2. Średnia różnica temperatur i powierzchnia wymiany ciepła	351
14.2. Bezwymiarowa analiza rekuperatorów — metoda Φ , P, R	352
14.2.1. Porównanie współprądu i przeciwprądu	354
14.2.2. Zestawy rekuperatorów	355
14.3. Rekuperator krzyżowoprądowy	357
14.4. Rekuperatory o złożonym przepływie czynników	361
14.5. Metoda efektywności cieplnej (ϵ , NTU)	363
14.5.1. Porównanie przedstawionych metod	364
14.6. Zagadnienie dodatkowe związane z obliczaniem wymienników ciepła	365
14.6.1. Uwzględnienie strat ciepła do otoczenia	365
14.6.2. Obliczenia dla zmiennego współczynnika przenikania ciepła	366
14.6.3. Obliczanie średnich temperatur czynników	366
14.7. Wymienniki „trójczynnikowe”	367
14.7.1. Element Fielda	368
14.7.2. Wymiennik pętlicowy	371
14.8. Regeneratory	372
14.8.1. Obliczanie powierzchni wymiany ciepła w regeneratorze ..	375
Współczynnik przekazywania ciepła k_c	377
Sprawność cieplna wypełnienia (ciepło zredukowane)	377

Zastępcza grubość wypełnienia	379
Powierzchnia i średnia różnica temperatury	379
14.8.2. Metody obliczania regeneratorów	379
Metoda Heiligenstaedta	380
Metoda Hausena	381
Metody Rummla i Schacka	383
Porównanie przedstawionych metod obliczeniowych.....	384
14.8.3. Rozkład temperatur w regeneratorze	384
Metody analityczne	385
Metody numeryczne (różnic skończonych) — omówienie ..	389
14.8.4. Obliczanie powierzchni regeneratora za pomocą metody efektywności cieplnej	389
14.8.5. Obliczanie rozkładu temperatury w regeneratorze obrotowym	392
LITERATURA	393