

SADRŽAJ

PREDGOVOR	1
SPISAK NAJVAŽNIJIH OZNAKA	7
UVOD	9
1. SUŠTINA PROVOĐENJA TOPLOTE I OSNOVNI ZAKONI	11
1.1. Polje temperature (temperatursko polje)	11
1.2. Gradijent temperature, toplotni fluks, Fourier-ov zakon	12
1.3. Koeficijent provođenja toplote (toplotna provodnost)	14
1.4. Jednačina konzervacije energije u čvrstim telima	21
1.5. Sličnost temperaturskih polja u čvrstim telima – teorija sličnosti	26
2. STACIONARNO PROVOĐENJE TOPLOTE	29
2.1. Stacionarno provođenje toplote kroz ravan zid	29
2.2. Stacionarno provođenje toplote kroz cilindričan zid	36
2.3. Stacionarno provođenje toplote kroz sferičan zid	41
2.4. Stacionarno provođenje toplote pri postojanju unutrašnjih toplotnih izvora	43
2.5. Stacionarno provođenje toplote kroz štapove i rebra	46
2.5.1. Provođenje toplote kroz štap (rebro) promenljivog poprečnog preseka	46
2.5.2. Provođenje toplote kroz štap (rebro) konstantnog poprečnog preseka	48
2.5.3. Razmena toplote kroz orebren ravan zid	53
2.5.4. Okruglo rebro konstantne debljine	55
2.5.5. Pravo rebro trougaonog profila	57
2.5.6. Pravo rebro minimalne mase	60
2.6. Problemi dvodimenzionog stacionarnog provođenja toplote	62

3.	ANALITIČKE METODE REŠAVANJA PROBLEMA NESTACIONARNOG PROVOĐENJA TOPLOTE	73
3.1.	Hlađenje ili zagrevanje tela sa malim otporom provođenju toplote	73
3.2.	Hlađenje (zagrevanje) neograničene ravne ploče	75
3.3.	Hlađenje (zagrevanje) kugle	82
3.4.	Hlađenje (zagrevanje) punog valjka	86
4.	KONVEKTIVNO PROSTIRANJE TOPLOTE	92
4.1.	Opšte karakteristike konvekcije	92
4.2.	Gustina i koeficijent zapreminskog širenja fluida	94
4.3.	Koeficijent viskoznosti	95
4.4.	Koeficijent provođenja toplote u fluidima	97
4.5.	Jednačine konzervacije materije, količine kretanja i energije	98
4.6.	Teorija sličnosti kod konvektivnog prostiranja toplote	105
4.7.	Konzervacione jednačine turbulentnog konvektivnog prostiranja toplote	110
5.	APROKSIMACIJE KONZERVACIONIH JEDNAČINA KONVEKTIVNOG PROSTIRANJA TOPLOTE PRI LAMINARNOM STRUJANJU	115
5.1.	Formiranje bezdimenzionih grupa	115
5.2.	Koncept graničnog sloja	118
5.3.	Jednačine graničnog sloja	120
6.	ANALITIČKO REŠAVANJE KONVEKTIVNOG PROSTIRANJA TOPLOTE PRI LAMINARNOM STRUJANJU	125
6.1.	Prostiranje toplote pri Couette-ovom strujanju	125
6.2.	Prostiranje toplote pri Hagen-Poiseuille-ovom strujanju	130
6.3.	Prostiranje toplote pri prinudnom laminarnom strujanju u cevima (Graetz-ov problem)	131
6.4.	Primena apraksimativnih jednačina tipa graničnog sloja za slučaj razmene toplote pri laminarnom strujanju duž ploče	136
6.5.	Prostiranje toplote pri laminarnom strujanju u vodovima proizvoljnog poprečnog preseka	144
7.	PROSTIRANJE TOPLOTE PRI TURBULENTNOM STRUJANJU ...	146
7.1.	Modeli turbulencije	147
7.1.1.	Modeli koji ne koriste diferencijalne jednačine za turbulentne veličine	148

7.1.2.	Modeli koji uključuju jednu turbulentnu veličinu kao zavisno promenljivu u diferencijalnoj jednačini	149
7.1.3.	Modeli koji uključuju dve turbulentne veličine kao zavisno promenljive u diferencijalnim jednačinama - dvojednačinski modeli turbulencije	149
7.2.	Aproksimacije konzervacionih jednačina u turbulentnom graničnom sloju - modelisanje pomoću Prandtl-ove hipoteze o putanji mešanja	150
7.3.	Raspodela brzine pri turbulentnom strujanju u glatkim cevima	155
7.4.	Koeficijent trenja pri turbulentnom strujanju u cevima	159
7.5.	Analogije prostiranja toplote i količine kretanja u turbulentnoj struji	160
8.	KONVEKTIVNO PROSTIRANJE TOPLOTE PRI OPSTRUJAVANJU TELA (SPOLJNA KONVEKCIJA)	168
8.1.	Prelaz toplote pri opstrujavanju cilindra (cevi)	168
8.2.	Prelaz toplote pri opstrujavanju kugle	170
8.3.	Razmena toplote pri poprečnom opstrujavanju snopa cevi	171
9.	PROSTIRANJE TOPLOTE PRI SLOBODNOJ (PRIRODNOJ) KONVEKCIJI	176
9.1.	Osnovne jednačine za slobodnu konvekciju u neograničenom prostoru	176
9.2.	Razmena toplote na vertikalnom ravnom zidu pri laminarnoj slobodnoj konvekciji	179
9.3.	Razmena toplote na telima različitih oblika pri slobodnoj konvekciji u neograničenoj zapremini fluida	184
10.	PROSTIRANJE TOPLOTE PRI PROMENI AGREGATNOG STANJA FLUIDA	187
10.1.	Prostiranje toplote pri kondenzaciji	187
10.1.1.	Laminarna filmska kondenzacija na vertikalnoj površini	190
10.1.2.	Filmska kondenzacija pare u prisustvu inertnih gasova	197
10.1.3.	Prostiranje toplote pri kapljičastoj kondenzaciji	199
10.1.4.	Parametri koji utiču na razmenu toplote pri kondenzaciji para	201
10.2.	Prostiranje toplote pri isparavanju tečnosti	203
10.2.1.	Termodinamičke osobenosti procesa ključanja	204
10.2.2.	Inzitet razmene toplote pri mehurastom ključanju	209
10.2.3.	Intenzitet razmene toplote pri filmskom isparavanju	211

11.	PROSTIRANJE TOPLOTE ZRAČENJEM	213
11.1.	Oblici flukseva zračenja (Načini definisanja)	216
11.2.	Osnovni zakoni toplotnog zračenja	219
12.	RAZMENA TOPLOTE ZRAČENJEM IZMEĐU ČVRSTIH TELA U PROZRAČNOJ SREDINI	229
12.1.	Razmena toplote zračenjem između dve paralelne ploče	230
12.2.	Razmena toplote zračenjem između dva tela koja obrazuju zatvoreni prostor sa prozračnom sredinom	234
12.3.	Razmena toplote zračenjem između dva tela proizvoljnog položaja u prozračnoj sredini	239
12.4.	Geometrijska svojstva flukseva zračenja i ugaonih koeficijenata	243
13.	ZRAČENJE GASOVA I PARA	245
13.1.	Osnove zračenja gasova i para	245
13.2.	Optička svojstva vodene pare i ugljen dioksida	251
14.	PROSTIRANJE TOPLOTE U POROZNOM MATERIJALU	
14.1.	Porozni materijal	
14.1.1.	Definicija i klasifikacija poroznih tela	
14.1.2.	Model poroznog materijala. Pojam dvojake poroznosti	
14.1.3.	Geometrijske karakteristike poroznih materijala	
14.1.4.	Strujne karakteristike poroznih materijala	
14.1.5.	Mehanizmi prostiranja toplote u poroznom materijalu	
14.2.	Strujanje kroz porozne materijale	
14.2.1.	Darcy-ev zakon	
14.2.2.	Ne-Darcy-eve strujne pojave	
14.3.	Matematički model za konvektivno prostiranje toplote u poroznoj sredini	
14.4.	Teorija zapreminskog osrednjavanja	
14.4.1.	Osnovna pravila i metode zapreminskog osrednjavanja	
14.4.2.	Primena teorije zapreminskog osrednjavanja na osnovne konzervacione jednačine	
15.	MOLEKULARNO PROSTIRANJE MATERIJE	256
15.1.	Osnove prostiranja materije	256
15.2.	Molekularna difuzija	258
15.2.1.	Stacionarna molekularna difuzija u fluidima	258
15.2.2.	Stacionarna molekularna difuzija u čvrstoj fazi	269

15.3.	Jednačina konzervacije materije	272
15.3.1.	Nestacionarna molekularna difuzija	276
16.	KONVEKTIVNO PROSTIRANJE MATERIJE	278
16.1.	Koeficijent prelaza materije	278
16.2.	Međufazna razmena materije	284
16.3.	Analogija postiranja materije, količine kretanja i toplote	288
17.	NUMERIČKE METODE REŠAVANJA PROBLEMA PROSTIRANJA TOPLOTE I MATERIJE	292
17.1.	Prednosti i nedostaci numeričke predikcije	293
17.2.	Suština numeričke predikcije	295
17.3.	Opšta (generalna) forma jednačine konzervacije	296
17.4.	Formulacije metoda diskretizacije	300
18.	METOD KONAČNIH RAZLIKA	303
18.1.	Metod konačnih razlika primenjen na stacionarni difuzioni problem	304
18.1.1.	Čvor (m,n) na adijabatskoj granici	307
18.1.2.	Čvor (m,n) u preseku dve adijabatske granice	308
18.1.3.	Čvor (m,n) na konvektivnoj granici	309
18.1.4.	Čvor (m,n) u preseku adijabatske i konvektivne granice	311
18.1.5.	Čvor (m,n) u preseku dve konvektivne granice	311
18.1.6.	Čvor (m,n) na granici sa kombinovanim graničnim uslovima	313
18.1.7.	Čvor (m,n) u blizini zakrivljene granice	314
18.2.	Metod konačnih razlika primenjen na nestacionarni difuzioni problem	315
18.2.1.	Eksplisitni metod aproksimacije	318
18.2.2.	Implicitni metod aproksimacije	325
18.2.3.	Modifikovani implicitni metod aproksimacije	328
18.2.4.	Ostale diskretizacione šeme	332
18.3.	Rešavanje diferencne (diskretizacione) jednačine	333
18.3.1.	TDMA metod	334
18.3.2.	Gauss-Siedel-ov iterativni metod	337
18.4.	Proširenje postupka diskretizacije na dvodimenzione i trodimenzione nestacionarne probleme	339
19.	METOD KONAČNIH ZAPREMINA	342
19.1.	Metod konačnih zapremina primenjen na stacionarni difuzioni problem	343
19.1.1.	Osnovna pravila	350

19.1.2.	Formulacija konačnih zapremina za jednodimenziono stacionarno provođenje toplote	351
19.1.3.	Fizička suština koeficijenata u diferencnoj jednačini	354
19.2.	Metod konačnih zapremina primenjen na nestacionarni difuzioni problem	355
19.2.1.	Eksplisitna šema	358
19.2.2.	Crank-Nicolson-ova šema	359
19.2.3.	Puna implicitna šema	360
19.3.	Ekstenzija postupka diskretizacije na dvodimenzione i trodimenzione probleme	361
19.4.	Iterativne metode rešavanja diferencne jednačine	363
19.4.1.	Gauss-Siedel-ov "point-by-point" iterativni metod	363
19.4.2.	Iterativni metod "line-by-line"	364
19.4.3.	Nadrelaksacija i podrelaksacija	364
19.5.	Metod konačnih zapremina primenjen na konvektivno-difuzioni problem	365
19.5.1.	Centralna diferencna šema (CDS)	367
19.5.2.	Uzvodna "upwind" šema (UDS)	368
19.5.3.	Egzaktno rešenje	371
19.5.4.	Eksponecijalna šema (EDS)	372
19.5.5.	Hibridna šema (HDS)	373
20.	SVOJSTVA NUMERIČKIH METODA	375
20.1.	Tačnost numeričkih metoda	375
20.2.	Konzistentnost	376
20.3.	Stabilnost	377
20.4.	Konvergencija	381
	OSNOVNA LITERATURA	382