

Univerzitet u Nišu
Mašinski fakultet u Nišu

Gradimir S. Ilić
Mića V. Vukić
Nenad V. Radojković
Predrag M. Živković
Ivan H. Stojanović

TERMODINAMIKA II

- osnove prostiranja toplote i materije -

Niš, 2014.



UNIVERZITET U NIŠU
MAŠINSKI FAKULTET U NIŠU



Gradimir S. Ilić
Mića V. Vukić
Nenad V. Radojković
Predrag M. Živković
Ivan H. Stojanović

TERMODINAMIKA II

- osnove prostiranja toplote i materije -

NIŠ, 2014

Autori:

dr Gradimir Ilić, redovni profesor Mašinskog fakulteta u Nišu
dr Mića Vukić, vanredni profesor Mašinskog fakulteta u Nišu
dr Nenad Radojković, redovni profesor Mašinskog fakulteta u Nišu u penziji
dr Predrag Živković, docent Mašinskog fakulteta u Nišu
mr Ivan Stojanović, Zavod za izradu novčanica i kovanog novca u Beogradu

TERMODINAMIKA II**- osnove prostiranja toplote i materije**

CIP - Каталогизација у публикацији
Народна библиотека Србије, Београд
536.2(075.8)

TERMODINAMIKA II : osnove prostiranja
toplote i materije / Gradimir Ilić ... [et
al.]. - Niš : Mašinski fakultet Univerziteta,
2014 (Niš : Unigraf X-Copy). - XIV, 398 str.
: graf. prikazi ; 24 cm

Tiraž 200. - Bibliografija: str. 397-398.

ISBN 978-86-6055-056-1

1. Илић, Градимир С., 1948- [аутор]

а) Топлота

COBISS.SR-ID 209242892

Recenzenti

Prof. dr Mladen Stojiljković, Mašinski fakultet Univerziteta u Nišu
dr Žarko Stevanović, naučni savetnik Instituta za nuklearne nauke Vinča

Izdavač

Mašinski fakultet Univerziteta u Nišu
Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, Srbija
Tel.: (++381 18) 588-255, 500-635, 500-689
Web adresa: <http://www.masfak.ni.ac.rs>

Za izdavača

Prof. dr Vlastimir Nikolić, dekan

Štampa

UNIGRAF X-COPY, Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, Srbija

Na osnovu Odluke Nastavno naučnog veća Mašinskog fakulteta u Nišu broj 612-465-8-1/14 od 14.07.2014.godine rukopis je odobren za štampu kao univerzitetski udžbenik.

ISBN 978 – 86 – 6055 – 056 - 1

Tiraž 200 primeraka

©Sva prava zadržavaju autori. Nije dozvoljeno da bez predhodne pismene dozvole autora bilo koji deo ove knjige bude snimljen, emitovan ili reprodukovano, uključujući, ali i ne ograničavajući se na fotokopiranje, fotografiju, magnetni ili bilo koji drugi vid zapisa.

PREDGOVOR

Udžbenik kome ste posvetili pažnju nastao je osavremenjavanjem i nadogradnjom teksta udžbenika *Termodinamika II – osnove prostiranja toplote*, koristeći pritom kao osnovnu građu identične ili delimično modifikovane celine ovog udžbenika, čiji su autori *dr Gradimir Ilić, dr Nenad Radojković i mr Ivan Stojanović*, u izdanju Mašinskog fakulteta u Nišu 1996. godine. U međuvremenu je dr Nenad Radojković postao penzioner Mašinskog fakulteta u Nišu, a mr Ivan Stojanović nastavio je svoje usavršavanje u privredi.

Udžbenik *Termodinamika II – osnove prostiranja toplote i materije* nastao je na osnovu predavanja koja je prvi autor držao više od dvadeset godina iz predmeta Termodinamika II studentima četvrte godine termoenergetskog profila, kao i predavanja koja su prvi, drugi i četvrti autor držali poslednjih pet godina iz predmeta Prostiranje toplote i mase i Numeričke simulacije u energetici i procesnoj tehnici studentima prve godine master studija na usmerenju Energetika i procesna tehnika, u skladu sa nastavnim planovima i programima Mašinskog fakulteta u Nišu. Deo sadržaja ovog udžbenika drugi autor držao je studentima druge godine osnovnih akademskih studija na studijskom programu Mašinsko inženjerstvo u okviru dela kursa Termodinamika, kao i studentima druge godine master studija na usmerenju Energetika i procesna tehnika u okviru dela kursa iz Difuzionih operacija i aparata.

U ovom udžbeniku autori su sem razmatranja prostiranja toplote, posebnu pažnju posvetili prostiranju materije i numeričkom tretmanu problema prostiranja toplote i materije. U udžbeniku su teorijski razmatrani različiti praktični problemi prostiranja toplote i materije, bez konkretnih numeričkih vrednosti relevantnih termo-strujnih veličina. Praktični primeri koji u potpunosti prate materiju prikazanu u udžbeniku, kao i termodinamički dijagramimi i tabele sa termofizičkim svojstvima, će se nalaziti u zasebnom udžbeniku.

Ovaj tekst je pre svega namenjen studentima, ali i svima onima koji se bave problematikom prostiranja toplote i materije, kao i rešavanjem problema prostiranja toplote i materije numeričkim metodama.

SADRŽAJ

PREDGOVOR	iii
SPISAK NAJVAŽNIJIH OZNAKA	xi
UVOD	1
1. SUŠTINA PROVOĐENJA TOPLOTE I OSNOVNI ZAKONI	3
1.1. Polje temperature (temperatursko polje)	3
1.2. Gradijent temperature, toplotni fluks, Fourier-ov zakon	4
1.3. Koeficijent provođenja toplote (toplotna provodnost)	6
1.4. Jednačina održanja energije u čvrstim telima	13
1.5. Sličnost temperaturskih polja u čvrstim telima - teorija sličnosti	18
2. STACIONARNO PROVOĐENJE TOPLOTE	21
2.1. Stacionarno provođenje toplote kroz ravan zid	21
2.2. Stacionarno provođenje toplote kroz cilindričan zid	28
2.3. Stacionarno provođenje toplote kroz sferičan zid	33
2.4. Stacionarno provođenje toplote pri postojanju unutrašnjih toplotnih izvora	35
2.5. Stacionarno provođenje toplote kroz štapove i rebra	38
2.5.1. Provođenje toplote kroz štap (rebro) promenljivog poprečnog preseka	38
2.5.2. Provođenje toplote kroz štap (rebro) konstantnog poprečnog preseka	40
2.5.3. Razmena toplote kroz orebren ravan zid	45
2.5.4. Okruglo rebro konstantne debljine	47
2.5.5. Pravo rebro trougaonog profila	49
2.5.6. Pravo rebro minimalne mase	52
2.6. Problemi dvodimenzionog stacionarnog provođenja toplote	54

3.	ANALITIČKE METODE REŠAVANJA PROBLEMA NESTACIONARNOG PROVOĐENJA TOPLOTE	64
3.1.	Hlađenje ili zagrevanje tela sa malim otporom provođenju toplote	64
3.2.	Hlađenje (zagrevanje) neograničene ravne ploče	67
3.3.	Hlađenje (zagrevanje) kugle	74
3.4.	Hlađenje (zagrevanje) punog valjka	78
4.	KONVEKTIVNO PROSTIRANJE TOPLOTE	84
4.1.	Opšte karakteristike konvekcije	84
4.2.	Gustina i koeficijent zapreminskog širenja fluida	86
4.3.	Koeficijent viskoznosti	87
4.4.	Koeficijent provođenja toplote u fluidima	89
4.5.	Jednačine održanja materije, količine kretanja i energije	90
4.6.	Teorija sličnosti kod konvektivnog prostiranja toplote	98
4.7.	Jednačine održanja materije, količine kretanja i energije pri turbulentnom konvektivnom prostiranju toplote	102
5.	APROKSIMACIJE JEDNAČINA ODRŽANJA ZA KONVEKTIVNO PROSTIRANJE TOPLOTE PRI LAMINARNOM STRUJANJU	107
5.1.	Formiranje bezdimenzionih grupa	107
5.2.	Koncept graničnog sloja	110
5.3.	Jednačine graničnog sloja	112
6.	ANALITIČKO REŠAVANJE KONVEKTIVNOG PROSTIRANJA TOPLOTE PRI LAMINARNOM STRUJANJU	117
6.1.	Prostiranje toplote pri Couette-ovom strujanju	117
6.2.	Prostiranje toplote pri Hagen-Poiseuille-ovom strujanju	122
6.3.	Prostiranje toplote pri prinudnom laminarnom strujanju u cevima (Graetz-ov problem)	123
6.4.	Primena apraksimativnih jednačina tipa graničnog sloja za slučaj razmene toplote pri laminarnom strujanju duž ploče	128
6.5.	Prostiranje toplote pri laminarnom strujanju u vodovima proizvoljnog poprečnog preseka	136
7.	PROSTIRANJE TOPLOTE PRI TURBULENTNOM STRUJANJU ...	138
7.1.	Modeli turbulencije	139
7.1.1.	Modeli koji ne koriste diferencijalne jednačine za turbulentne veličine	140

7.1.2.	Modeli koji uključuju jednu turbulentnu veličinu kao zavisno promenljivu u diferencijalnoj jednačini	141
7.1.3.	Modeli koji uključuju dve turbulentne veličine kao zavisno promenljive u diferencijalnim jednačinama - dvojednačinski modeli turbulencije	141
7.2.	Aproksimacije jednačina održanja u turbulentnom graničnom sloju - modelisanje pomoću Prandtl-ove hipoteze o putanji mešanja	142
7.3.	Raspodela brzine pri turbulentnom strujanju u glatkim cevima	147
7.4.	Koeficijent trenja pri turbulentnom strujanju u cevima	151
7.5.	Analogije prostiranja toplote i količine kretanja u turbulentnoj struji	152
8.	KONVEKTIVNO PROSTIRANJE TOPLOTE PRI OPSTRUJAVANJU TELA (SPOLJNA KONVEKCIJA)	159
8.1.	Prelaz toplote pri opstrujavanju cilindra (cevi)	159
8.2.	Prelaz toplote pri opstrujavanju kugle	162
8.3.	Razmena toplote pri poprečnom opstrujavanju snopa cevi	163
9.	PROSTIRANJE TOPLOTE PRI SLOBODNOJ (PRIRODNOJ) KONVEKCIJI	168
9.1.	Osnovne jednačine za slobodnu konvekciju u neograničenom prostoru	168
9.2.	Razmena toplote na vertikalnom ravnom zidu pri laminarnoj slobodnoj konvekciji	171
9.3.	Razmena toplote na telima različitih oblika pri slobodnoj konvekciji u neograničenoj zapremini fluida	176
10.	PROSTIRANJE TOPLOTE PRI PROMENI AGREGATNOG STANJA FLUIDA	179
10.1.	Prostiranje toplote pri kondenzaciji	179
10.1.1.	Laminarna filmska kondenzacija na vertikalnoj površini	182
10.1.2.	Filmska kondenzacija pare u prisustvu inertnih gasova	189
10.1.3.	Prostiranje toplote pri kapljičastoj kondenzaciji	191
10.1.4.	Parametri koji utiču na razmenu toplote pri kondenzaciji para	193
10.2.	Prostiranje toplote pri isparavanju tečnosti	195
10.2.1.	Termodinamičke osobenosti procesa ključanja	196
10.2.2.	Inzitet razmene toplote pri mehurastom ključanju	201
10.2.3.	Intenzitet razmene toplote pri filmskom isparavanju	203

11.	PROSTIRANJE TOPLOTE ZRAČENJEM	205
11.1.	Oblici flukseva zračenja (načini definisanja)	208
11.2.	Osnovni zakoni toplotnog zračenja	211
12.	RAZMENA TOPLOTE ZRAČENJEM IZMEĐU ČVRSTIH TELA U PROZRAČNOJ SREDINI	221
12.1.	Razmena toplote zračenjem između dve paralelne ploče	222
12.2.	Razmena toplote zračenjem između dva tela koja obrazuju zatvoreni prostor sa prozračnom sredinom	226
12.3.	Razmena toplote zračenjem između dva tela proizvoljnog položaja u prozračnoj sredini	231
12.4.	Geometrijska svojstva flukseva zračenja i ugaonih koeficijenata	235
13.	ZRAČENJE GASOVA I PARA	237
13.1.	Osnove zračenja gasova i para	237
13.2.	Optička svojstva vodene pare i ugljen dioksida	243
14.	PROSTIRANJE TOPLOTE U POROZNOM MATERIJALU	248
14.1.	Porozni materijal	249
14.1.1.	Definicija i klasifikacija poroznih tela	249
14.1.2.	Model poroznog materijala. Pojam dvojake poroznosti	249
14.1.3.	Geometrijske karakteristike poroznih materijala	250
14.1.4.	Strujne karakteristike poroznih materijala	252
14.1.5.	Mehanizmi prostiranja toplote u poroznom materijalu	254
14.2.	Strujanje kroz porozne materijale	256
14.2.1.	Darcy-jev zakon	256
14.2.2.	Ne-Darcy-jeve strujne pojave	257
14.3.	Matematički model za konvektivno prostiranje toplote u poroznoj sredini	260
14.4.	Teorija zapreminskog osrednjavanja	263
14.4.1.	Osnovna pravila i metode zapreminskog osrednjavanja	263
14.4.2.	Primena teorije zapreminskog osrednjavanja na osnovne jednačine održanja	265
15.	MOLEKULARNO PROSTIRANJE MATERIJE	271
15.1.	Osnove prostiranja materije	271
15.2.	Molekularna difuzija	273
15.2.1.	Stacionarna molekularna difuzija u fluidima	273
15.2.2.	Stacionarna molekularna difuzija u čvrstoj fazi	284

15.3.	Jednačina održanja materije	287
15.3.1.	Nestacionarna molekularna difuzija	291
16.	KONVEKTIVNO PROSTIRANJE MATERIJE	293
16.1.	Koeficijent prelaza materije	293
16.2.	Međufazna razmena materije	299
16.3.	Analogija postiranja materije, količine kretanja i toplote	303
17.	NUMERIČKE METODE REŠAVANJA PROBLEMA PROSTIRANJA TOPLOTE I MATERIJE	307
17.1.	Prednosti i nedostaci numeričke predikcije	308
17.2.	Suština numeričke predikcije	310
17.3.	Opšta (generalna) forma jednačine održanja	311
17.4.	Formulacije metoda diskretizacije	315
18.	METOD KONAČNIH RAZLIKA	318
18.1.	Metod konačnih razlika primenjen na stacionarni difuzioni problem	319
18.1.1.	Čvor (m,n) na adijabatskoj granici	322
18.1.2.	Čvor (m,n) u preseku dve adijabatske granice	323
18.1.3.	Čvor (m,n) na konvektivnoj granici	324
18.1.4.	Čvor (m,n) u preseku adijabatske i konvektivne granice	326
18.1.5.	Čvor (m,n) u preseku dve konvektivne granice	326
18.1.6.	Čvor (m,n) na granici sa kombinovanim graničnim uslovima	328
18.1.7.	Čvor (m,n) u blizini zakrivljene granice	329
18.2.	Metod konačnih razlika primenjen na nestacionarni difuzioni problem	330
18.2.1.	EksPLICITNI metod aproksimacije	333
18.2.2.	IMPLICITNI metod aproksimacije	340
18.2.3.	Modifikovani implicitni metod aproksimacije	343
18.2.4.	Ostale diskretizacione šeme	347
18.3.	Rešavanje diferentne (diskretizacione) jednačine	348
18.3.1.	TDMA metod	349
18.3.2.	Gauss-Siedel-ov iterativni metod	352
18.4.	Proširenje postupka diskretizacije na dvodimenzione i trodimenzione nestacionarne probleme	354
19.	METOD KONAČNIH ZAPREMINA	357
19.1.	Metod konačnih zapremina primenjen na stacionarni difuzioni problem	358
19.1.1.	Osnovna pravila	365

19.1.2.	Formulacija konačnih zapremina za jednodimenziono stacionarno provođenje toplote	366
19.1.3.	Fizička suština koeficijenata u diferentnoj jednačini	369
19.2.	Metod konačnih zapremina primenjen na nestacionarni difuzioni problem	370
19.2.1.	Eksplicitna šema	373
19.2.2.	Crank-Nicolson-ova šema	374
19.2.3.	Puna implicitna šema	375
19.3.	Ekstenzija postupka diskretizacije na dvodimenzione i trodimenzione probleme	376
19.4.	Iterativne metode rešavanja diferentne jednačine	378
19.4.1.	Gauss-Siedel-ov "point-by-point" iterativni metod	378
19.4.2.	Iterativni metod "line-by-line"	379
19.4.3.	Nadrelaksacija i podrelaksacija	379
19.5.	Metod konačnih zapremina primenjen na konvektivno-difuzioni problem	380
19.5.1.	Centralna diferentna šema (CDS)	382
19.5.2.	Uzvodna "upwind" šema (UDS)	383
19.5.3.	Egzaktno rešenje	386
19.5.4.	Eksponencijalna šema (EDS)	387
19.5.5.	Hibridna šema (HDS)	388
20.	SVOJSTVA NUMERIČKIH METODA	390
20.1.	Tačnost numeričkih metoda	390
20.2.	Konzistentnost	391
20.3.	Stabilnost	392
20.4.	Konvergencija	396
	OSNOVNA LITERATURA	397