

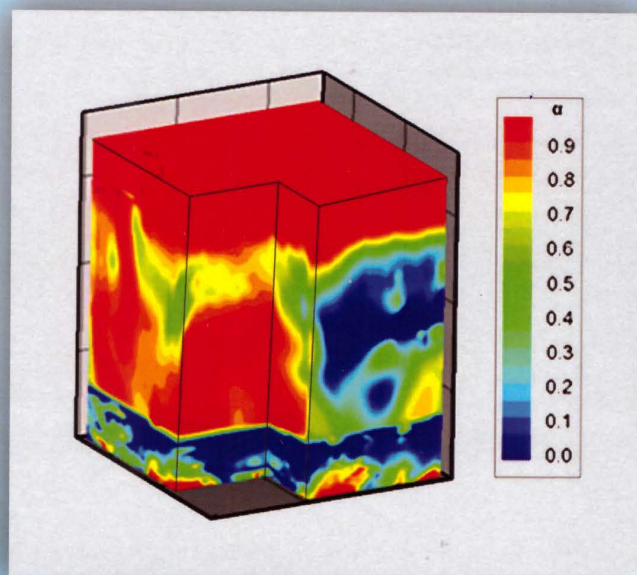


UNIVERZITET U NIŠU
MAŠINSKI FAKULTET U NIŠU



Dragoljub Živković

TERMODINAMIKA VIŠEFAZNIH STRUJANJA



Niš, 2021.

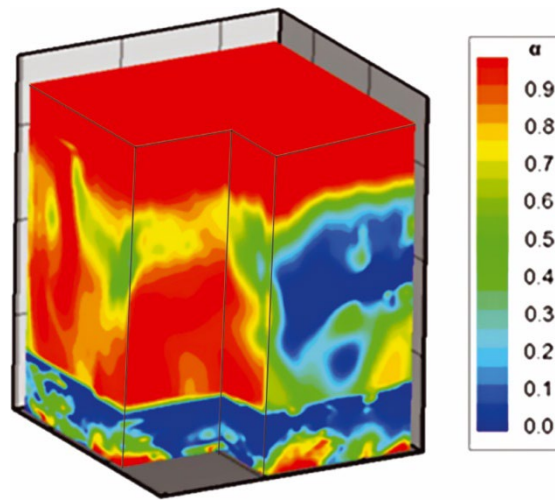


UNIVERZITET U NIŠU
MAŠINSKI FAKULTET



Dragoljub Živković

TERMODINAMIKA VIŠEFAZNIH STRUJANJA



Niš, 2021.

Naslov publikacije: Termodinamika višefaznih strujanja

Autor: dr Dragoljub Živković, redovni profesor Mašinskog fakulteta Univerziteta u Nišu.

Recenzenti: dr Mića Vukić, redovni profesor Mašinskog fakulteta Univerziteta u Nišu,
dr Predrag Rašković, redovni profesor Tehnološkog fakulteta u Leskovcu Univerziteta u Nišu,
dr Jelena Janevski, redovni profesor Mašinskog fakulteta Univerziteta u Nišu,

Izdavač: Mašinski fakultet Univerziteta u Nišu,
ul. Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš.

Štampa: „GALEB”, Niš.

Tiraž: 100 primeraka.

CIP - Каталогизација у публикацији
Народна библиотека Србије, Београд

532.542:536-1(075.8)

ЖИВКОВИЋ, Драгољуб, 1955-

Termodinamika višefaznih strujanja / Dragoljub Živković. - Niš :
Mašinski fakultet Univerziteta, 2021 (Niš : Galeb). - 325 str. : ilustr. ; 24 cm

Tiraž 100. - Oznake: str. 1-4. - Bibliografija: str. 314-325.

ISBN 978-86-6055-149-0

а) Флуиди -- Струјање -- Термодинамика, техничка

COBISS.SR-ID 42886153

Na prednjoj strani korica prikazani su rezultati CFD analize dvofaznog strujanja.

SADRŽAJ

OZNAKE	1
1. UVOD	5
1.1. Istorijat	7
1.2. Pravci istraživanja pojava u dvofaznom toku kod nas	10
1.3. Eksperimentalno proučavanje prenosa toplote i mase pri strujanju dvofazne mešavine	11
1.4. Matematičko modeliranje termodinamike dvofaznog strujanja	12
2. MAPE STRUJANJA	14
2.1. Uvod	14
2.2. Istosmerno strujanje u vertikalnoj cevi naviše	15
2.2.1. Opis strujanja	15
2.2.2. Mape strujanja	18
2.3. Istosmerno strujanje u vertikalnoj cevi naniže	23
2.3.1. Opis strujanja	23
2.3.2. Mape strujanja	24
2.4. Istosmerno strujanje u horizontalnoj cevi	25
2.4.1. Opis strujanja	25
2.4.2. Mape strujanja	27
3. MATEMATIČKI MODELI VIŠEFAZNIH STRUJANJA	32
3.1. Uvod	32
3.2. Modeli mešavine	33
3.2.1. Homogeni model dvofaznog strujanja	34
3.2.2. Model klizanja faza – Klizni model Lochart - Martinelia	36
3.2.3. „Drift-flux” model	41
3.3. Model dva fluida	44
3.3.1. Zakoni održanja u vektorskom obliku	44
3.3.2. Zakoni održanja u razvijenom obliku za parnu i za tečnu fazu posebno	47
3.4. Konstitutivne korelacije	50
3.4.1. Geometrijske relacije	51
3.4.2. Sila međufaznog trenja	52
3.4.3. Sila trenja pri strujanju dvofazne mešavine oko snopa cevi	56
3.4.4. Brzina isparavanja i kondenzacije	57
3.5. Prenosnje toplote sa primarnog na sekundarni fluid	58
4. ADIJABATSKO ISPARAVANJE	61
4.1. Uvod	61
4.2. Klasifikacija dekompresije tečnosti	62
4.3. Karakteristike pojave adijabatskog isparavanja u struji tečnosti	62
4.4. Parametri koji opredeljuju razvoj adijabatskog isparavanja u struji tečnosti	64
4.4.1. Veličina i oblik razdelne površine između faza	65

4.5.	Termo-hidraulički procesi u kritičnoj struji tečnosti	66
4.5.1.	Definicija i značaj problema	67
4.5.2.	Modeliranje adijabatskog isparavanja	71
5.	ANULARNO DVOFAZNO STRUJANJE	78
5.1.	Uvod	78
5.2.	Primena anularnog strujanja	80
5.3.	Opis anularnog dvofaznog strujanja	81
5.4.	Model tri fluida	84
5.5.	Model dva fluida	87
6.	BAZENSKO KLJUČANJE	91
6.1.	Uvod	91
6.2.	Fizikalnost procesa bazenskog ključanja	96
6.2.1.	Mehanizam mehurastog isparavanja	100
6.2.2.	Mehurasto ključanje u velikim masama tečnosti	107
6.2.3.	Proračun kritičnog toplotnog fluksa (prvi i drugi krizis ključanja)	109
6.3.	Savremena eksperimentalna istraživanja	112
6.4.	Rezultati numeričke analize bazenskog ključanja	119
6.4.1.	Kriza ključanja	123
7.	PRINUDNO KONVEKTIVNO KLJUČANJE	126
7.1.	Uvod	126
7.2.	Fizički i matematički modeli trodimenzionalnog dvofaznog strujanja preko cevnog snopa i povezani prenos toplote i fenomen ključanja	129
7.2.1.	Jednačine ravnoteže za dvofazno strujanje pare i tečnosti oko cevi u snopu	130
7.2.2.	Zakoni koji zatvaraju probleme (closure laws)	135
7.2.2.1.	Strujni otpor cevnog snopa	139
7.2.2.2.	Međufazna razmena	141
7.2.3.	Jednačina energijskog bilansa za grejni strujni fluid unutar cevi	142
7.2.4.	Prolaz toplote sa primarne na sekundarnu stranu	142
7.3.	Termo-hidraulika horizontalnog generatora pare za različite stacionarne nivoe snage	144
8.	KRIZA KLJUČANJA PRI STRUJANJU MEŠAVINE	154
8.1.	Uvod	154
8.2.	Razvoj modela krize ključanja	155
8.2.1.	Strujanje u vertikalnoj cevi četvrtastog poprečnog preseka	157
8.2.2.	Strujanje u vertikalnoj cevi okruglog poprečnog preseka	159
8.2.2.1.	Jednacije odžanja mase, količine kretanja i energije za slučaj polarno-cilindričnih koordinata	159
8.3.	Prikaz i analiza dobijenih rezultata simulacije krize razmene toplote	161
8.3.1.	Strujanje u vertikalnoj cevi kvadratnog poprečnog preseka	162
8.3.2.	Strujanje u cilindričnoj vertikalnoj cevi	165

9.	RAZMENA TOPLOTE PRI KONDENZACIJI	169
9.1.	Uvod	169
9.2.	Kondenzaciono postrojenje	170
9.3.	Prenos toplote pri kondenzaciji pare na čvrstim površinama	173
9.3.1.	Nusselt-ova teorija filmske kondenzacije	173
9.3.2.	Berman-ova metoda za određivanje srednjeg koeficijenta prolaza toplote u kondenzatoru	175
9.4.	Prenos toplote pri filmskoj kondenzaciji pri strujanju pare preko snopa cevi	177
9.5.	Kondenzacija pare u prisustvu nekondenzujućih gasova	180
9.6.	Matematički model strujanja pare i razmene toplote u energetskim kondenzatorima	183
10.	TERMOHIDRAULIČKA NESTABILNOST DVOFAZNIH STRUJANJA	190
10.1.	Uvod	190
10.2.	Statička nestabilnost	191
10.3.	Dinamička nestabilnost	194
10.4.	Prirodna cirkulacija dvofazne mešavine	199
10.5.	Kriterijalne analize predviđanja područja termohidrauličkih nestabilnosti	200
10.6.	Hidrodinamika paralelnih cevni zmiya pri prinudnom strujanju dvofazne mešavine	202
10.7.	Pulsacije u isparivačkim sistemima	208
11.	SIGURNOST NUKLEARNIH ELEKTRANA	214
11.1.	Uvod	214
11.2.	Reaktor hlađen vodom pod pritiskom (PWR)	216
11.3.	Ključajući reaktor (BWR)	217
11.4.	Analiza akcidenata	218
11.4.1.	Akcident u elektrani „Three Mile Island“	219
11.4.2.	Akcident u Černobilju	222
11.4.3.	Akcident u reaktorima hlađenim vodom pod pritiskom (PWR)	228
11.4.4.	Akcident u ključajućem reaktoru (BWR)	238
12.	STRUJANJE VLAŽNE VODENE PARE	245
12.1.	Uvod	245
12.2.	Raspršeno-prstenasto strujanje	245
12.2.1.	Jednačine održanja mase	245
12.2.2.	Jednačine održanja količine kretanja	251
12.2.3.	Jednačina održanja energije	254
12.3.	Prostiranje slabih poremećaja u dvofaznim sredinama	257
12.3.1.	Relaksacione osobine vlažne pare	257
12.3.2.	Brzina zvuka u vlažnoj pari	260
12.3.3.	Osnovni sistem jednačina	261
12.4.	Proračun relaksacionih gubitaka pri strujanju vlažne vodene pare kroz rešetke parnih turbina	264

12.4.1. Proračun porasta entropije pri strujanju vlažne vodene pare	265
12.4.2. Analiza uslova minimizacije produkcije entropije u lopatičnoj rešetki	268
12.5. Proračun promene entropije vlažne vodene pare usled kosog udarnog talasa	270
12.5.1. Osnovni sistem jednačina za proračun promene entropije usled relaksacionih procesa	271
12.5.2. Promena entropije vlažne vodene pare usled kosog udarnog talasa	273
13. TERMOHIDRAULIČKI UDAR	278
13.1. Uvod	278
13.2. Posledice hidrauličkog udara	280
13.3. Uzroci pojave hidrauličkog udara	281
13.4. Incident u sistemu daljinskog grejanja u Fort Wainwright-u (Aljaska, USA)	288
13.5. Matematički model hidrauličkog udara	292
13.5.1. Hidraulički udar indukovao kondenzacijom	292
13.5.2. Matematički model jednodimenzionalnog nestacionarnog strujanja homogenog fluida	293
13.5.3. Numeričko rešenje jednačine konzervacije energije	296
13.5.4. Određivanje brzine zvuka	298
14. ISTICANJE NAKON LOMA CEVI GENERATORA PARE	300
14.1. Uvod	300
14.2. Simulacija loma cevi vertikalnog generatora pare u nuklearnoj elektrani „KRŠKO”	303
14.3. Simulacija loma cevi horizontalnog generatora pare u nuklearnom reaktoru „WWER-1000”	308
14.3.1. Određivanje kritičnog protoka isticanja dvofazne mešavine	310
14.3.2. Određivanje vrednosti masenog protoka isticanja hladioca jezgra reaktora	312
LITERATURA	314

PREDGOVOR

Knjiga „Termodinamika višefaznih strujanja” napisana je prema programu istoimenog predmeta, koji se izučava na I godini doktorskih studija na Mašinskom fakultetu Univerziteta u Nišu. Knjiga je prvenstveno namenjena studentima Mašinskog fakulteta u Nišu i drugih fakulteta koji izučavaju različite oblike višefaznih strujanja pri kojima dolazi do promene termodinamičkih veličina stanja. Ona može biti od koristi i studentima tehnoloških fakulteta koji u okviru smjera za hemijsko inženjerstvo izučavaju višefazna strujanja. U knjizi su pored teorijskih objašnjenja termodinamike višefaznih strujanja, detaljno prikazani brojni matematički modeli, kao i primeri primene ovih modela na realne objekte kao što su nuklearni reaktori, generatori pare, kondenzatori, parne turbine, itd. Posebna pažnja je poklonjena problemima sigurnosti rada pojedinih uređaja i postrojenja u kojima se javljaju višefazna strujanja. Analizirana je sigurnost nuklearnih elektrana, kriza ključanja, termohidraulički udar, isticanje radnog medijuma nakon loma cevi generatora pare, itd.

Autor je siguran da će ova knjiga biti od koristi i inženjerima koji se bave projektovanjem, eksploatacijom i održavanjem uređaja i postrojenja kod kojih dolazi do isparavanja ili kondenzacije radne materije. Bolje teorijsko poznavanje ovih procesa će svakako doprineti povećanju energetske efikasnosti, pouzdanosti i sigurnosti rada pomenutih uređaja i postrojenja.

Veliku zahvalnost autor upućuje recenzentima ove knjige: dr Mići Vukiću, redovnom profesoru Mašinskog fakulteta Univerziteta u Nišu, dr Predragu Raškoviću, redovnom profesoru Tehnološkog fakulteta Univerziteta u Nišu i dr Jeleni Janevski, redovnom profesoru Mašinskog fakulteta Univerziteta u Nišu, koji su rukopis veoma pažljivo pročitali i dali korisne primedbe i sugestije.

Autor će biti zahvalan svim čitaocima ove knjige, posebno studentima i stručnjacima iz prakse, koji budu uputili svoje primedbe i sugestije u cilju poboljšanja njenog sadržaja.

U Nišu, maja 2021.

Autor



Dr Dragoljub Živković, redovni profesor Mašinskog fakulteta Univerziteta u Nišu, rođen je 26.03.1955. godine u Leskovcu. Osnovnu školu i gimnaziju na prirodno-matematičkom smeru završio je u Leskovcu sa odličnim uspehom. Oba puta je nagrađen diplomama „Vuk Stefanović-Karadžić“.

Na Mašinskom fakultetu u Beogradu, na smeru za temoenergetiku, diplomirao je 15.02.1980.godine odbranom diplomskog rada pod nazivom „Automatsko puštanje u rad parnog turbopostrojenja“. Magistarski rad pod nazivom „Dinamičko ponašanje parne turbine pri dejstvu zaštitnih uređaja“ odbranio je 1985. godine. Doktorsku disertaciju pod nazivom „Izučavanje dinamičkog ponašanja parnih turbina pri nestacionarnim režimima rada“ odbranio je 1993. godine. U okviru izrade doktorske disertacije boravio je školske 1985/

86. godine šest meseci na Mašinskom fakultetu Tehničkog Univerziteta u Pragu radi specijalizacije iz oblasti analize nestacionarnih procesa i višefaznih strujanja u termoenergetskim postrojenjima.

Dr Dragoljub Živković je na Mašinskom fakultetu u Nišu izabran za docenta 1993. godine, vanrednog profesora 1998. godine i redovnog profesora 2003. godine. Držao je nastavu iz većeg broja predmeta na osnovnim, master i doktorskim studijama iz oblasti termoenergetike, termotehnike i procesne tehnike. Bio je mentor većeg broja diplomskih i master radova, kao i tri magistrature i četiri doktorata. Dva urađena doktorata su 2019. i 2021. godine proglašeni za najbolje urađene doktorske disertacije u Srbiji iz oblasti mašinskog inženjerstva.

Profesor dr Dragoljub Živković je objavio 9 univerzitetskih udžbenika i zbirki zadataka, preko 200 radova u domaćim i međunarodnim časopisima, kao i na domaćim i međunarodnim naučnim konferencijama. Učestvovao je u realizaciji većeg broja nacionalnih i međunarodnih naučnih i inovacionih projekata.

Za izuzetan doprinos razvoju Mašinskog fakulteta i Univerziteta u Nišu nagrađen je Poveljom Mašinskog fakulteta 2021. godine i Srebrnim znakom Univerziteta u Nišu 2018. godine.