

Odlukom nastavno-naučnog veća Mašinskog fakulteta Univerziteta u Nišu, broj 612-398-5/2014 od 17. juna 2014. godine, imenovan sam za recenzenta rukopisa pod nazivom

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

čiji su autori:

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

Uvidom u dostavljeni rukopis može se konstatovati sledeće:

Rukopis, dostavljen na recenziranje sadrži dvadeset poglavlja. Sastavni deo materijala je i naslovna strana, generalne informacije, predgovor, sadržaj i spisak referenci. Rukopis ima 396 stranica kucanog teksta osnovnog materijala, bez priloga. Naslovna strana, generalne informacije, predgovor i sadržaj imaju ukupno 14 strana, dok su reference date na dve strane. Tekst je bogato dokumentovan nizom slika, grafika i tabela. Sadrži 152 slike i 17 tabela. Na kraju se nalazi spisak referenci od 40 naslova.

Rukopis pored Predgovora, Sadržaja, Spiska najvažnijih oznaka, Uvoda i Osnovne literature sadrži dvadeset poglavlja. Redosled poglavlja je sledeći:

1. Suština provođenja toplote i osnovni zakoni
2. Stacionarno provođenje toplote
3. Analitičke metode rešavanja problema nestacionarnog provođenja toplote
4. Konvektivno prostiranje toplote
5. Aproksimacije konzervacionih jednačina konvektivnog prostiranja toplote pri laminarnom strujanju
6. Analitičko rešavanje konvektivnog prostiranja toplote pri laminarnom strujanju
7. Prostiranje toplote pri turbulentnom strujanju
8. Konvektivno prostiranje toplote pri opstrujavanju tela (spoljna konvekcija)
9. Prostiranje toplote pri slobodnoj (prirodnoj) konvekciji
10. Prostiranje toplote pri promeni agregatnog stanja fluida
11. Prostiranje toplote zračenjem
12. Razmena toplote zračenjem između čvrstih tela u prozračnoj sredini
13. Zračenje gasova i para
14. Prostiranje toplote u poroznom materijalu
15. Molekularno prostiranje materije
16. Konvektivno prostiranje materije
17. Numeričke metode rešavanja problema prostiranja toplote i materije
18. Metod konačnih razlika
19. Metod konačnih zapremina
20. Svojstva numeričkih metoda

Poglavlja su grupisana u tri celine. Prva celina odnosi se na prostiranje toplote i prikazana je u poglavljima od 1 do 14. Druga celina posvećena je prostiranju materije što je prikazano u poglavljima 15 i 16. Treća celina obuhvata poglavlja od 17 do 21 i u njoj su date osnove numeričkih metoda rešavanja problema prostiranja toplote i materije.

Prvo poglavlje autori su posvetili opštim pojmovima iz prostiranja toplote provođenjem - kondukcijom. Najpre je definisano temperatursko polje, zatim gradijent temperature i toplotni fluks preko Fourier-ovog zakona. Razmatran je koeficijent provođenja toplote čvrstih tela, tečnosti i gasova. Zatim je izvedena jednačina konzervacije energije u čvrstim telima ili diferencijalna jednačina provođenja toplote, koja daje opštu vezu između temperature, vremena i prostornih koordinata. Definisani su granični uslovi. Na kraju ovog poglavlja razmatrana je sličnost temperaturskih polja u čvrstim telima. Autori pokazuju da je jednakost Fourier-ovih i Biot-ovih brojeva potreban i dovoljan uslov sličnosti provođenja toplote u čvrstom telu sa graničnim uslovima treće vrste na površini.

U drugom poglavlju autori su razmatrali stacionarno provođenje toplote kroz ravan, cilindričan i sferičan zid, najpre bez unutrašnjih izvora (ponora) toplote, a zatim sa unutrašnjim izvorom (ponorom) toplote. Autori, zatim obrađuju stacionarno provođenje toplote kroz štapove i rebra i to kroz rebro promenljivog kao i konstantnog poprečnog preseka. Razmatrana je razmena toplote kroz orebren ravan zid i kroz zid cevi sa okruglim rebrima konstantne debljine. Pri određivanju optimalnog oblika rebra, glavno pitanje je da li se može uštedeti na materijalu ako se koristi drugi oblik profila rebra umesto pravougaonog. Zbog toga autori razmatraju orebrenje pravim rebrima trougaonog profila i pokazuju da ušteda u materijalu pri korišćenju trougaonog rebra umesto pravougaonog pri istom toplotnom fluksu iznosi 44 %. Analiza provođenja toplote kod razmatranih rebara konstantne debljine pokazuje da specifični toplotni fluks neprestano opada sa porastom rastojanja od njihove osnove. Ovo znači da se materijal rebra ne koristi podjednako duž visine rebra; najbolje iskorišćenje je u osnovi, a najlošije na vrhu rebra. Traženje takve geometrije rebara, kod koje će materijal imati ravnomernu iskorišćenost duž cele visine rebra direktno je povezano sa utroškom materijala pri izvođenju orebrenih razmenjivača toplote. Autori zbog navedenog razmatraju pravo rebro minimalne mase. Na kraju ovog poglavlja analizirano je dvodimenziono stacionarnim provođenje toplote kroz ravnu poluograničenu homogenu ploču, kao i provođenje toplote kroz ograničeni cilindar.

U trećem poglavlju razmatrano je nekoliko slučajeva nestacionarnog prostiranja toplote. Najpre je rešavan problem hlađenja (zagrevanja) tela sa malim otporom provođenju toplote, a zatim slučajevi hlađenja (zagrevanja) neograničene ravne ploče, kugle i valjka.

Četvrto poglavlje se bavi konvektivnim prostiranjem toplote. Analiza konvektivnog prostiranja toplote je znatno komplikovanija u odnosu na konduktivno prostiranje toplote pošto se istovremeno izučava i kretanje fluida i proces prenosa energije. Date su opšte karakteristike konvekcije. Definisani su: koeficijent zapreminskog širenja, koeficijent viskoznosti i koeficijent provođenja toplote u fluidima. U cilju opisivanja strujanja fluida udruženog sa prenosom toplote postavljene su diferencijalne jednačine mehanike kontinuuma, odnosno jednačine održanja (konzervacije) materije, količine kretanja i energije sa odgovarajućim uslovima jednoznačnosti njihovog rešavanja. Analitičko rešavanje navedenih sistema diferencijalnih jednačina, uz zadovoljavanje zadatih početnih i graničnih uslova, moguće je samo u ograničenom broju veoma jednostavnih strujnih konfiguracija kod kojih se praktično unapred može predvideti brzinsko polje. Zadovoljavanje početnih i graničnih uslova kao i spregnutost jednačina po brzinama i temperaturi, čine u stvari nepremostivu teškoću pri analitičkom rešavanju ovih sistema jednačina. Stoga autori pažnju usmeravaju na teoriju sličnosti i dimenzionu analizu. Na kraju ovog poglavlja date su konzervacione jednačine turbulentnog konvektivnog prostiranja toplote. Prikazan je postupak osrednjavanja jednačina konzervacije: materije, količine kretanja i energije.

U petom poglavlju autori prikazuju teoriju graničnog sloja. Koncept graničnog sloja originalno postavljen za uprošćenje samo jednačina kretanja, ovde se primenjuje za uprošćenje jednačina konvektivnog transporta toplote. Kod koncepta graničnog sloja, strujanje oko nekog čvrstog tela se deli u dva područja: područje vrlo tankog sloja u blizini površine tela, koje se naziva graničnim slojem, gde su gradijenti brzine i temperature veoma izraženi i područje van graničnog sloja, koje se naziva područjem

potencijalnog strujanja u kome su gradijenti brzine i temperature mali i u kome se strujanje fluida obavlja praktično bez trenja. Koncept graničnog sloja, daje uglavnom dobar opis brzinskog i temperaturnog polja, u situacijama kada su gradijenti temperature i brzine u pravcu glavne struje mnogo manji od onih u pravcu normalnom na zid. Jednačine graničnog sloja dobijaju se iz egzaktne konzervacione jednačine konvektivnog prostiranja toplote uz pomoć analize reda veličine svakog člana u njima i zanemarivanjem onih članova čiji je red veličine mali.

U **šestom poglavlju** autori prikazuju nekoliko jednostavnih primera određivanja brzinskog i temperaturnog polja za prinudnu konvekciju u laminarnoj struji unutar kanala (unutrašnja konvekcija). Pri analitičkom rešavanju realnih problema sreće se veoma mali broj slučajeva gde kvadratni članovi u konzervacionim jednačinama otpadaju zbog prirode problema. Takva su, na primer, potencijalna strujanja viskoznih fluida i strujanja u graničnom sloju. Uprošćenja konzervacionih jednačina tipa graničnog sloja uglavnom se primenjuju na slučajeve opstrujavanja čvrstih tela (spoljna konvekcija). U ovom poglavlju autori su razmatrali: prostiranje toplote pri Couette-ovom strujanju, prostiranje toplote pri Hagen-Poiseuille-ovom strujanju, prostiranje toplote pri prinudnom laminarnom strujanju u cevima (Graetz-ov problem), kao i primenu apraksimativnih jednačina tipa graničnog sloja za slučaj razmene toplote pri laminarnom strujanju duž ploče i prostiranje toplote pri laminarnom strujanju u vodovima proizvoljnog poprečnog preseka.

Sedmo poglavlje bavi se prostiranjem toplote pri turbulentnom strujanju fluida. Jednačine konzervacije (održanja) materije, količine kretanja i energije napisane preko srednjih i fluktuacionih vrednosti promenljivih (tzv. osrednjene jednačine) za slučaj turbulentnog strujanja ne čine više zatvoren sistem jednačina, kao što je to bilo kod laminarnog strujanja. U osrednjenim jednačinama kretanja i energije javljaju se dopunski turbulentni članovi koji karakterišu dodatni transport odgovarajuće transportne veličine, bilo količine kretanja, bilo količine toplote, koji se ostvaruje sa fluktuacionim brzinama. Pošto osrednjene jednačine konzervacije za turbulentno konvektivno prostiranje toplote sadrže suviše nepoznatih, osnovni zadatak pri modelisanju ovih jednačina je naći relacije koje povezuju turbulentno prostiranje količine kretanja (odnosno Reynolds-ove napone) kao i turbulentni toplotni fluks sa osrednjenim strujnim parametrima. U zavisnosti od toga kakve vrste relacija se uspostavlja između turbulentnih članova i srednjih veličina razlikuju se algebarski, diferencijalni i integralni turbulentni modeli. Autori prikazuju: modele koji ne koriste diferencijalne jednačine za turbulentne veličine, modeli koji uključuju jednu turbulentnu veličinu kao zavisno promenljivu u diferencijalnoj jednačini i modele koji uključuju dve turbulentne veličine kao zavisno promenljive u diferencijalnim jednačinama (dvojednačinski modeli turbulencije). Na kraju ovog poglavlja prikazane su: Reynolds-ova, Prandtl-ova i von Karman-ova analogija prostiranja toplote i količine kretanja u turbulentnoj struji.

U **osmom poglavlju** autori su razmatrali prostiranje toplote pri opstrujavanju tela (spoljna konvekcija) i dali su kriterijalne jednačine koje korelišu eksperimentalne rezultate razmene toplote pri spoljnoj konvekciji za nekoliko karakterističnih geometrija (cilindar, kugla, snop cevi) opstrujanih tela, a koje su već stekle široku primenu u inženjerskoj praksi jer su više puta proveravane, korigovane i uopštavane od strane naučne javnosti.

Deveto poglavlje posvećeno je prostiranjima toplote pri slobodnoj (prirodnoj) konvekciji. Date su osnovne jednačine za slobodnu konvekciju u neograničenom prostoru. Analizirana je razmena toplote na vertikalnom ravnom zidu pri laminarnoj slobodnoj konvekciji, kao i razmena toplote na telima različitih oblika pri slobodnoj konvekciji u neograničenoj zapremini fluida.

U **desetom poglavlju** razmatrana je razmena toplote pri promeni agregatnog stanja fluida. To je proces koji se veoma često sreće u industrijskoj praksi; do takve situacije se uvek dolazi u slučaju razmene toplote između fluida i čvrste površine, ako se fluid koji kontaktira datu površinu nalazi istovremeno i u tečnom i u parnom stanju. Istovremeno učešće dve faze datog fluida u procesu, povećava broj uticajnih veličina i značajno usložava kvalitativnu i kvantitativnu analizu. Od procesa razmene toplote pri promeni agregatnog stanja najvećeg praktičnog značaja su kondenzacija raznih vidova para i isparavanje (ključanje) tečnosti. Iz navedenih razloga autori su posebno obradili: laminarnu filmsku kondenzaciju na vertikalnoj površini, filmsku kondenzaciju pare u prisustvu inertnih gasova, prostiranje toplote pri

kapljičastoj kondenzaciji, razmenu toplote pri mehurastom ključanju i razmenu toplote pri filmskom isparavanju.

U **jedanaestom poglavlju** su date osnove prostiranja toplote zračenjem i osnovni zakoni zračenja: Planck-ov zakon, Wien-ov zakon pomeranja, Stefan-Boltzmann-ov zakon, Zakon Kirchhoff-a i Lambert-ov zakon.

Dvanaesto poglavlje posvećeno je razmeni toplote zračenjem između čvrstih tela u prozračnoj sredini. Posebo je analizirana razmena toplote zračenjem između dve paralelne ploče, zatim razmena toplote zračenjem između dva tela koja obrazuju zatvoreni prostor sa prozračnom sredinom i razmena toplote zračenjem između dva tela proizvoljnog položaja u prozračnoj sredini. Na kraju ovog poglavlja autori daju geometrijska svojstva flukseva zračenja i ugaonih koeficijenata.

U **trinaestom poglavlju** najpre su date osnove zračenja gasova i para i Bouguer-ov zakon. Kako su vodena para i ugljen dioksid najčešće parno-gasne komponente koje se sreću u termotehničkim i termoeenergetskim uređajima i aparatima, autori zbog toga u ovom poglavlju daju njihova optička svojstva koja imaju suštinski značaj pri proračunu i projektovanju ložišta peći i kotlova, sušara, grejnih tela itd.

Četrnaesto poglavlje bavi se fenomenima strujanja fluida, prostiranja toplote i materije u poroznim materijalima koji su prisutni u velikom broju procesa u energetici, procesnoj i hemijskoj industriji i oblasti zaštite čovekove sredine. Nakon definicije i klasifikacije poroznih tela, prikazan je model poroznog materijala, definisan je pojam dvojake poroznosti i date su geometrijske i strujne karakteristike poroznih materijala. Postavljen je matematički model za konvektivno prostiranje toplote u poroznoj sredini.

U **petnaestom poglavlju** najpre su date teorijske osnove prostiranja materije. Prostiranje materije ostvaruje se na principijalno dva različita načina: molekularnom difuzijom i konvekcijom. Zbog toga autori u ovom poglavlju obrađuju najpre stacionarnu molekularnu difuziju u fluidima, a zatim stacionarnu molekularnu difuziju u čvrstoj fazi. Dati su I i II Fick-ov zakon difuzije. Na kraju poglavlja razmatran je problem nestacionarne molekularne difuzije.

U **šesnaestom poglavlju** razmatrano je konvektivno prostiranje materije. Prirodna težnja je da se ubrza proces prostiranja materije u difuzionim aparatima, kako bi se time smanjile dimenzije aparata, a samim tim i investicioni troškovi. Strujanjem fluida ostvaruje se konvektivni transport materije ili konvektivna difuzija. Najpre je definisan koeficijent prelaza materije u zavisnosti od pogonske sile, koji pokazuje koja količina materije prelazi od površine razdvajanja faza u jezgro faze (ili u suprotnom smeru) kroz jedinicu površine u jedinici vremena pri pogonskoj sili jednakoj jedinici. Zatim je prikazano određivanje koeficijent prelaza materije primenom jednog uprošćenog modela konvektivne difuzije koji se u literaturi naziva model filma, kao i metoda koji je zasnovan na teoriji sličnosti. U većini praktičnih problema prostiranje materije odvija se pri kontaktu dve faze (gas-tečnost ili tečnost-tečnost), pri čemu se materija transportuje iz unutrašnjosti jedne faze ka površini razdvajanja faza, zatim kroz površinu razdvajanja faza i na kraju kroz drugu fazu. Analogno prostiranju toplote, ovakav način prostiranja materije naziva se prolaz materije. Intenzitet prostiranja materije u ovom slučaju zavisice od fizičkih osobina i termo-strujnih uslova jedne i druge faze. Prostiranje materije u pojedinačnim fazama ostvaruje se konvektivnim putem (prelaz mase). U literaturi se mogu naći različiti modeli koji opisuju međufaznu razmenu materije, a autori ovog rukopisa su prikazali model dva filma koji su razvili Lewis i Whitman. Na kraju ovog poglavlja razmatrana je analogija prostiranja materije, količine kretanja i energije.

U **sedamnaestom poglavlju** autori daju osnove numeričkih metoda rešavanja problema prostiranja toplote i materije. Predstavljene su prednosti i nedostaci numeričke predikcije. Numeričko rešavanje prostiranja toplote i materije, strujnih i drugih procesa može da počne onda kada zakoni koji upravljaju ovim procesima (fizički model procesa) budu izraženi u matematičkom obliku, uglavnom pomoću parcijalnih diferencijalnih jednačina. Parcijalna diferencijalna jednačina kojom se opisuje neki od fenomena prostiranja materije, količine kretanja ili energije ustvari izražava konzervacioni princip za određenu transportnu veličinu. Autori pokazuju da sve jednačine konzervacije imaju istu formu, odnosno da se sve pojedinačne jednačine konzervacije mogu zapisati u opštoj formi konzervacione jednačine sa

opštom transportnom veličinom Φ . Za datu diferencijalnu jednačinu, potrebne diskretizacije jednačine mogu se razviti na više načina. Autori su ukazali na osnovne karakteristike nekoliko poznatih i po suštini različitih metoda diskretizacije (metod konačnih razlika, metod konačnih zapremina, metoda konačnih elemenata, statističke metode).

U **osamnaestom poglavlju** je razmatrana aproksimacija uz pomoć metoda konačnih razlika parcijalne diferencijalne jednačine za difuzione probleme. Najpre je razmatran dvodimenzioni stacionarni difuzioni problem sa izvornim članom, a zatim jednodimenzioni nestacionarni difuzioni problem bez izvornog člana i izvršena je ekstenzija uspostavljene procedure aproksimacije za dvodimenzione i trodimenzione nestacionarne probleme. Iz analize je izostavljen konvektivni član. Navedeni slučajevi u potpunosti odgovaraju molekularnom prostiranju toplote, odnosno materije.

Devetnaesto poglavlje posvećeno je metodi konačnih zapremina. U ovom poglavlju razmatrana je aproksimacija uz pomoć metoda konačnih zapremina svih članova diferencijalne jednačine konzervacije date u opštoj formi. Najpre je prikazana aproksimacija uz pomoć metoda konačnih zapremina diferencijalne jednačine koja upravlja stacionarnim difuzionim problemom sa izvornim članom. Data su osnovna pravila diskretizacije. Prikazana je fizička suština koeficijenata u diferentnoj jednačini. Zatim je razmatrana aproksimacija diferencijalne jednačine koja upravlja nestacionarnim difuzionim problemom sa izvornim članom. Izvršena je ekstenzija postupka diskretizacije na dvodimenzione i trodimenzione probleme. Data je suština iterativnih metoda za rešavanje diferentne jednačine i objašnjena je nadrelaksacija i podrelaksacija. Na kraju ovog poglavlja je metod konačnih zapremina primenjen na konvektivno-difuzioni problem i to na najjednostavniji stacionarni jednodimenzioni konvektivno-difuzioni problem bez izvornog člana. Različite pretpostavke o profilu za konvektivni član dovode do različitih diferentnih šema. Posebno su obrađene: centralno diferentna šema, uzvodna "upwind" šema, eksponencijalna šema i hibridna šema. Postupci razvoja diferentne jednačine koji su prikazani sprovedeni su za poznato strujno polje. Autori zaključuju da značajni problemi nastaju pri razvoju diferentne jednačine za slučaj kad nije poznato strujno polje. Postupci razvoja diferentne jednačine za konvektivno difuzione probleme, uključujući i adekvatan tretman graničnih uslova, standardne i specijalne izvorne članove, kao i odgovarajuće iterativne metode za rešavanje algebarskih relacija mogu se naći u specijalizovanoj literaturi iz ove oblasti.

U **dvadesetom poglavlju** autori su razmatrali osnovna svojstva (tačnost, konzistentnost, stabilnost, konvergencija) numeričkih metoda. Analiza stabilnosti pobuđuje veliki interes u numeričkoj analizi, kako je jedan od odlučujućih pokazatelja tačnosti rešenja. Može biti sprovedena na više načina. Za diskretizaciju metodima konačnih razlika i konačnih zapremina je najčešće primenjivana Von Neumann-ova metoda. Posebno je razmatrana stabilnost eksplcitne i pune implicitne šeme.

Priloženim rukopisom autori su imali nameru da osavremene i nadgrade tekst udžbenika **Termodinamika II – osnove prostiranja toplote**, u izdanju Mašinskog fakulteta u Nišu 1996. godine, koristeći pritom kao osnovnu građu identične ili delimično modifikovane celine ovog udžbenika, čiji su autori bili dr Gradimir Ilić, dr Nenad Radojković i mr Ivan Stojanović. Kako u mnogim praktičnim slučajevima prostiranje toplote protiče istovremeno sa prostiranjem materije, to su autori u ovom rukopisu posebnu pažnju posvetili ovoj problematici. Poznato je da metodi klasične matematike koji se primenjuju pri rešavanju sistema diferencijalnih jednačina kojima se opisuju problemi prostiranja materije, količine kretanja i energije uspevaju da reše veoma mali broj uprošćenih praktičnih situacija u zatvorenoj formi. Šta više, ova rešenja često sadrže beskonačne redove, specijalne funkcije, transcendentne jednačine za sopstvene vrednosti, itd., što je i prikazano u razmatranim problemima prostiranja toplote i materije. Zbog toga su autori treći deo rukopisa posvetili numeričkim metodama rešavanja problema prostiranja toplote i materije. Ovim se znatno podiže nivo obaveštenosti studenata i inženjera koji se bave prostiranjem toplote i materije.

U tom smislu materijal predstavlja sasvim zadovoljavajuću osnovu za edukaciju studenata, širenje znanja širokom spektru stručnih lica iz oblasti prostiranja toplote i materije u energetici i procesnoj tehnici.

ZAKLJUČAK

Rukopis, sa priloženim sadržajem, predstavlja dobru osnovu ne samo za studente koji izučavaju probleme iz oblasti prostiranja toplote i materije u okviru većeg broja predmeta na Mašinskom fakultetu u Nišu i kojima je ovaj rukopis prvenstveno namenjen, već i za studente drugih fakulteta na kojima se ova materija izučava, kao i za sve one koji se bave ovom problematikom u inženjerskoj praksi.

S obzirom da trenutno u opusu dostupne literature iz ove oblasti na našem jeziku ne postoji udžbenička literatura u kojoj su celovito obrađeni problemi prostiranja toplote i materije, sa odgovarajućim numeričkim tretmanom istih, slobodan sam da sa posebnim zadovoljstvom preporučim da se rukopis pod nazivom

"TERMODINAMIKA II

- osnove prostiranja toplote i materije"

čiji su autori:

dr Gradimir Ilić, redovni profesor Mašinskog fakulteta Univerziteta u Nišu,

dr Mića Vukić vanredni profesor Mašinskog fakulteta Univerziteta u Nišu,

dr Nenad Radojković, redovni profesor Mašinskog fakulteta Univerziteta u Nišu u penziji,

dr Predrag Živković, docent Mašinskog fakulteta Univerziteta u Nišu,

mr Ivan Stojanović, Zavod za izradu novčanica i kovanog novca Beograd,

kategoriše kao **univerzitetski udžbenik** i kao takav štampa sa ubeđenjem da će naići na šire interesovanje stručne i naučne javnosti iz oblasti prostiranja toplote i materije.

U Nišu,

04.07.2014.

Recenzent



dr Mladen Stojiljković, red. prof..