

2. Rezultati istraživanja u oblasti prostiranja toplote i materije

2.1. PROUČAVANJE PROCESA KLUČANJA I DVOFAZNOG STRUJANJA - Dušan Spasojević

POČECI

Tehnološki značaj sa jedne i neistraženost mehanizama fizičkih procesa, sa druge strane bili su podsticaj i naučni izazov, da krajem pedesetih godina, u novoosnovanoj Laboratoriji za reaktorsku termotehniku i reaktorske materijale započnu proučavanja fenomena prenosa materije, količine kretanja i energije pri ključanju i strujanju dvofaznih mešavina. Naime, neposredno po osnivanju ove Laboratorije, nekoliko mlađih saradnika upućeno je u inostranstvo u poznate naučne centre na školovanje i naučno usavršavanje u oblasti prenosa mase i toplote. Njihovim povratkom stvoreni su uslovi za naučno-istraživački rad i u ovoj oblasti.

Početakom naučno-istraživačkog rada u oblasti ključanja i dvofaznog strujanja može se smatrati doktorska disertacija *Miodraga Novakovića*, koja je odbranjena 1959. godine, na Univerzitetu u Londonu (Queen Mary College) /1/. U ovoj disertaciji je obuhvaćeno eksperimentalno i teorijsko proučavanje dvofaznog toka mešavine voda-vodena para u horizontalnim cevima kružnog preseka. Njen osnovni naučni doprinos je eksperimentalna potvrda zavisnosti pada pritiska u dvofaznom toku od: radnog pritiska, specifičnog protoka fluida, masenog sadržaja komponenti smeše faza i veličine podužne promene masenog sadržaja smeše faza. Interesantno je da su ovi rezultati bili objavljeni samo nekoliko godina posle objavljivanja antologijskih radova iz ove oblasti (Lokhart-Martinellia, Martinelli-Nelsona i Lottes) i da su u odnosu na njih uneli niz značajnih novina u fizički model i interpretaciju akceleracijske komponente pada pritiska u dvofaznom toku. Doktorske disertacije *Naima Afgana* /2/ i *Nenada Kondića* /3/, koje su započete u toku specijalizacija u Nacionalnoj Laboratoriji u Argonu (Chicago -SAD), a završene u našoj Laboratoriji, i sredinom 60-tih godina odbranjene, među prvim u ovoj naučnoj oblasti na Beogradskom univerzitetu, predstavljale su nastavak započetih istraživanja u ovoj oblasti. Na ovaj način su bili ostvareni potrebni uslovi da istraživanja fenomena ključanja i dvofaznog strujanja budu definitivno uključena u naučno-istraživački program Laboratorije. Naime, stvorena je kvalifikovana kadrovska osnova, kvalitetna metodološka podloga, a razvijena je i adekvatna eksperimentalna infrastruktura, tako da je program istraživanja u ovoj oblasti mogao uspešno da se odvijao se u tri osnovna, naučno komplementarna pravca pravca:

- * proučavanje zakonomernosti procesa ključanja tečnosti u velikoj zapremini;
- * proučavanje procesa prenosa mase i toplote pri strujanju dvofazne smeše;
- * matematičko modeliranje fizičkih procesa prenosa mase i toplote u struji dvofazne smeše.

Od osnivanja Laboratorije, u oblasti ključanja i dvofaznog strujanja obavljena su istraživanja u obimu od oko 250 istraživač-godina, čiji su rezultati prikazani u: više desetina radova objavljenih u vrhunskim međunarodnim naučnim časopisima; u više stotina radova saopštenih na međunarodnim i nacionalnim naučnim skupovima; više desetina doktorskih distertacija i magistarskih radova itd.

PROUČAVANJE KLUČANJA TEČNOSTI U VELIKOJ ZAPREMINI

Fundamentalna istraživanja fenomena ključanja tečnosti u velikoj zapremini započeta su početkom 60-tih godina i trajala su više od 20 godina, praktično do početka 80-tih godina, kada je težište naših istraživanja prebačeno na proučavanje fenomena ključanja u struji dvofazne smeše. Pored velikog broja objavljenih radova, iz ovih istraživanja su proistekle dve doktorske disertacije /2, 6/ i veći broj magistarskih radova /10, 12, 13, 16,17, 18, 20/. Ova istraživanja su imala izrazito eksperimentalni karakter, a izvođena su na "stonim" eksperimentalnim aparaturama za proučavanje ključanja tečnosti u velikoj zapremini: (a) sa horizontalne / vertikalne, elektrootporno grejane, čelične cevi (F5.5/4.5 mm) /2, 19/; (b) sa površine tankog sloja žive /6, 12, 13/; (c) sa horizontalne / vertikalne čvrste, glatke površine /16, 18, 20/. Uz korišćenje: specijalno razvijenog mikrotermopara za merenje brzopromenljivih temperaturskih polja u graničnom sloju ključajuće tečnosti u blizini grejne površine, i u sloju oko i u parnom mehuru /6, 18, 20/; postupka za brzo sakupljanje podataka, pomoću sedmokanalnog, instrumentalnog magnetofona i njihove dalje računarske obrade /20, 30, 32/; postupka za praćenje dinamike rasta mehura i istovremeno očitavanje pokazivanja mikro- termopara sa brzom kino kamerom (do 10.000 kadrova/s) /6, 7, 12, 18, 20/. Pri čemu su, kao modelske tečnosti korišćene: voda, živa, etilalkohol, benzol, N-heptan, N-heksan i razne mešavine tečnosti.

Iz proučavanja mehanizama toplotnih i fluidnodinamičkih pojava pri ključanju smeše etilalkohola i benzola na horizontalnoj, elektrootporno grejanoj, čeličnoj cevi (F45,5/4,5x150 mm) proistekla je doktorska disertacija *Naima Afgana* /2/. Onovni zaključci ovih istraživanja su: prelaz iz režima mehurastog u režim filmskog ključanja i pri ključanju mešavina tečnosti predstavlja u prvom redu hidrodinamičku pojavu i maksimalni toplotni

fluks pregorevanja pri ključanju binarnih mešavina zavisi od razlike koncentracija komponenti u tečnoj i parnoj fazi. Na osnovu ovih zaključaka razvijena je nova metoda za detekciju prelaza iz režima mehurastog u režim filmskog ključanja tečnosti, što je predstavljalo i novu metodu za određivanje toplotnog fluksa pregorevanja i merenja temperature u trenutku pregorevanja, sa tačnošću od 0,5 °C.

Istraživanja pojave ključanja u velikoj zapremini su nastavljena proučavanjem uticaja toplotnog fluksa na rast, veličinu i učestanost pojavljivanja i otkidanja mehura pri ključanju vode i etilalkohola sa površine tankog sloja žive. Na osnovu rezultata ovih istraživanja, koji su prikazani u magistarskom radu *Ljubomira Jovanovića* /12/, zaključeno je da: (a) ključanje sa površine tankog sloja žive u suštini se ne razlikuje od ključanja sa čvrste polirane metalne površine; (b) srednje vreme rasta mehura je konstantno i u konvektivnom i u režimu razvijenog mehurastog ključanja i za vodu i za etilalkohol; (c) učestanost otkidanja mehura raste sa porastom toplotnog fluksa i, konačno, (d) prelaz iz režima konvektivnog ključanja u režim razvijenog mehurastog ključanja dešava se pri određenoj korelaciji vrednosti Kutateladzeovog i Pekleovog broja.

Na aparaturi za proučavanje ključanja tečnosti sa tankog sloja žive proučavano je i pregrejanje tečnosti i prenos toplote. Rezultati ovih istraživanja, prikazani su u magistarskom radu *Miodraga Stefanovića* /13/, dovel su do zaključka da su: (a) eksperimentalno dobijene vrednosti za maksimalno pregrejanje N-heptana i N-heksana se slažu sa teorijskim vrednostima; (b) eksperimentalno dobijene vrednosti za pregrejanja vode, benzola, etilalkohola i N-pentana, pri ključanju na idealno glatkoj površini, nisu se slagale sa teorijom Bankofa, jer je u ovoj teoriji uticaj hrapavosti grejne površine bio preceñjivan.

Istraživanja su nastavljena proučavanjem ključanja binarnih smeša u velikoj zapremini. Rezultati proučavanja ključanja ovih tečnosti na idealno glatkim i na hrapavim površinama, prikazani u magistarskom radu *Milana Dimića* /16/, dovel su do zaključka da je: (a) karakter promene koeficijenta prelaza toplote u saglasnosti sa razlikom ravnotežnih sastava parne i tečne faze; (b) za azeotropne tačke ponašanje binarne mešavine je analogno jednodimenzionalnim sistemima i (c) hrapavost grejne površine je bitna za intenzitet prelaza toplote. Rezultat proučavanja dinamike rasta i otkidanja mehura pri ključanju binarne smeše etilalkohol-voda na idealno glatkoj, horizontalnoj, ravnoj površini, prikazani su u magistarskom radu *Vladimira Valenta* /19/. Utvrđeno je da pri ključanju binarnih smeša, prečnik mehura pri otkidanju, brzina rasta mehura i vrednost Jakobovog broja zavise od sastava tečne faze smeše i da imaju maksimalne vrednosti za 25-30 mas% etilalkohola u tečnoj fazi, dok koeficijent prelaza toplote pri ovom sastavu tečne faze ima minimalnu vrednost. Rezultati proučavanja fluktuacije temperature u graničnom sloju pri ključanju binarne smeše voda-etilalkohol na vertikalnoj, elektrootporno grejanoj čeličnoj cevi (F5,5/4,5x155 mm), prikazani su u magistarskom radu *Miće Marića* /17/, pokazali su da pri ključanju binarnih mešavina, pregrejanje tečne u odnosu na gasnu fazu je znatno manje nego pri ključanju čistih tečnosti i da ovo pregrejanje raste sa porastom razlike koncentracija lakoisparljive komponente u pari i u tečnosti.

Značajna pažnja u proučavanju pojave ključanja u velikoj zapremini bila su posvećena određivanju korelacije polja temperature tečnosti u okolini usamljenog mehura sa brzinom rasta mehura, čiji su rezultati prikazani u magistarskom radu *Ejupa Ganića* /18/. Pri ovim istraživanjima, vršena je uporedna analiza rezultata predloženog matematičkog modela toplotnih procesa u sloju ključajuće tečnosti i eksperimentalno dobijenih rezultata, koja je omogućila određivanje zakonitosti veze između gradijenta temperature (toplotnog fluksa) u sloju tečnosti oko mehura i brzine rasta mehura.

Proučavanja analognog zapisa signala fluktuacije temperature pri ključanju tečnosti i njegovo razlaganje na fluktuaciju temperature u ključajućoj tečnosti i fluktuaciju temperature u gasovitoj fazi imaju izuzetan značaj za fizičko razumevanje i modeliranje procesa ključanja. Zbog toga su ova istraživanja privukla posebnu pažnju, a njihovi rezultati su prikazani u magistarskom radu *Larise Jović* /20/. Na osnovu zaključaka prethodnih istraživanja formulisani su kriterijumi i razvijena je metoda za uslovno uzorkovanje signala fluktuacije temperature u ključajućem sloju. Korišćenjem ove metode izvršeno je razdvajanje signala fluktuacije temperature na područje koje odgovara gasovitoj fazi i područje koje odgovara okolnoj tečnoj fazi i graničnom sloju pregrejanje tečne faze. Zaključeno je da fluktuacija temperature u pregrejanom sloju tečnosti prati rast mehura i ima izražen deterministički karakter.

Proučavanja fenomena ključanja u velikoj zapremini obuhvatala su i proces pothlađenog ključanja tečnosti. Polazeći od pretpostavke da za intenzitet prenosa toplote pri ključanju presudni značaj ima proces nukleacije. U doktorskoj disertaciji *Miodraga Stefanovića* /6/, zaključeno je da u realnim uslovima do nukleacije dolazi pri znatno nižim pregrejanjima nego u slučaju idealnih uslova. Ovo se objašnjava termičkim neravnotežama u sloju tečnosti, koje su prouzrokovane međudejstvima grejne površine i tog sloja. Rezultati ovih istraživanja su pokazali da je uobičajen izbor parametara koji definišu ovu neravnotežu, u principu, dobar, ali da su fizički mehanizmi njihovog uzajamnog delovanja sagledani dosta grubo. Tako da, uprkos vrlo kvalitetnim merenjima fluktuacija temperature u ključajućem sloju, ona nisu dala dovoljno informacija za sagledavanje fizičkih mehanizama navedenih pojava. Konačno, zaključeno je da su za dalja modeliranja fizičkih mehanizama procesa

interakcije sloja ključajuće tečnosti i grejne površine potrebna interdisciplinarna istraživanja i to pre u oblasti fizike nego u oblasti makroskopskog prenosa toplote.

U vezi sa prethodnim zaključkom, interesantan je i inspirativan teorijski model *Milorada Ristića* /40/, prema kome se termodinamičko ponašanje, uključujući i fazne prelaze tečnosti, dovodi u vezu sa mehaničkim ponašanjem struktura koje prave molekuli u određenoj tečnosti. Polazeći od pretpostavke da se ove strukture, koje su nazvane "klasterima", ne ponašaju na isti način na faznom međupovršini kao u masi tečnosti. Na osnovu fizičkog modela ponašanja klastera molekula, u ovom radu se daju interesantna tumačenja mehanizama fizičkih procesa strujnih i toplotnih pojava u tečnostima i faznim prelazima.

PROUČAVANJE PRENOSA MASE I TOPLOTE PRI STRUJANJU DVOFAZNE SMEŠE

Prvi rad koji se bavio proučavanjem procesa ključanja u struji dvofazne smeše je pomenuta doktorska disertacija *Modraga Novakovića* /1/. Istraživanja u ovoj blasti su nastavljena proučavanjem procesa difuzionog izdvajanja mikročestica iz adijabatske struje dvofaznog toka, koji su prikazani u doktorskoj disertaciji *Nenada Kondča* /3/. Pored definisanja matematičkog modela procesa i određivanja osnovne korelacije koja opisuje zakonomernost procesa izdvajanja mikrokapi iz kapljičastog dvofaznog toka, značajan doprinos ovih istraživanja predstavlja razvoj nove eksperimentalne metode za određivanje intenziteta izdvajanja mikrokapi iz adijabatske struje kapljičastog dvofaznog toka.

Istraživanja procesa prenosa materije, količine kretanja i energije, u principu, zahtevaju znatno složeniju eksperimentalnu infrastrukturu od one koja se koristi pri proučavanju ključanja tečnosti u velikoj zapremini. Zbog toga su značajni naponi bili uloženi u cilju stvaranja adekvatne infrastrukture: izgrađeno je eksperimentalno kolo visokog pritiska /62/ i eksperimentalno kolo sa tri paralelna kanala za proučavanje fenomena u nestacionarnom dvofaznom toku voda-vazduh /65/.

Na kolu visokog pritiska istraživanja su započeta proučavanjem strukture dvofaznog toka pri ključanju dvofazne smeše voda-vodena para visokog kvaliteta, čiji su rezultati prikazani u doktorskoj disertaciji *Ljubomira Jovanovića* /4/. Na osnovu ovih istraživanja bilo je utvrđeno da postoje dva karakteristična područja uticaja protoka hladioca i toplotnog fluksa na koeficijent prenosa toplote. Naime, u području niskih vrednosti masenog udela vodene pare u dvofaznoj mešavini, reda nekoliko procenata, koeficijent prenosa toplote zavisi od toplotnog fluksa i specifičnog masenog protoka hladioca, dok u području visokih vrednosti masenog udela vodene pare u mešavini, preko 5%, koeficijent prenosa toplote zavisi, uglavnom, od veličine masenog udela. Na osnovu analize signala fluktuacije temperature u dvofaznoj mešavini, utvrđeno je da u prvom području dvofazna mešavina ima mehurasti, a u drugoj anularno-disperzni režim strujanja. Konačno, korišćenjem rezultata ovih istraživanja izvedena je korelacija za određivanje koeficijenta prenosa toplote koja važi za obe oblasti, čime je potvrđeno postojanje karakteristične brzine dvofazne smeše kao veličine za korelisanje prenosa toplote u dvofaznom toku.

U savremenim termoenergetskim postrojenjima, po pravilu, radni fluid je na povišenom pritisku i povišenoj temperaturi, pa iz zahteva za sigurnim radom ovih postrojenja proističe potreba proučavanja hidrodinamičkog i toplotnog ponašanja radnog fluida u uslovima brzih promena parametara režima rada postrojenja. Zbog toga se proučavanju pojava adijabatskog isparavanja u struji zagrejane tečnosti posvećuje velika pažnja, rezultati tih istraživanja prikazani su u doktorskoj tezi *Milovana Studovića* /7/. Za potrebe eksperimentalnog dela ovih istraživanja izgradjena je specijalna instalacija. Eksperimentalni deo ovih istraživanja zahtevao je kontinualno merenje brzine rasta mehura u struji pregrejane tečnosti duž eksperimentalne mlaznice. Za ove potrebe korišćena je brza kino kamera. Na osnovu dobijenih rezultata zaključeno je da se kinetika isparavanja može teorijski opisati samo ako se poznaju veličine stanja i parametri strujanja, a pre svega specifična generacija pare i brzina uspostavljanja ravnoteže.

U poznavanju strujanja dvofaznih smeša posebno mesto i značaj imaju karakteristike njihove hidrodinamičke stabilnosti. Zbog toga je aktivnostima na proučavanju ovih karakteristika bila posvećena odgovarajuća pažnja. Za potrebe ovih istraživanja izgrađena je eksperimentalna instalacija za proučavanje nestacionarnih režima strujanja mešavine voda-vazduh /63/. Prva istraživanja na ovoj aparaturi bavila su se određivanjem brzine prostiranja kinematskog talasa, a posebno, proučavanjem uticaja kompresibilnosti gasne faze dvofazne smeše na ovu brzinu /44/. Na ovoj instalaciji je postavljen ambiciozan eksperiment za proučavanje karakteristika nestacionarnog strujanja dvofazne smeše voda-vazduh u tri vertikalna paralelna kanala. Rezultati ovih istraživanja prikazani su u doktorskoj tezi *Valerija Jovića* /9/. Zaključci ovih istraživanja mogu se iskazati na sledeći način: (a) dobijena dinamička karakteristika sistema ima oblik koji je specifičan za prostiranje talasa koncentracije u dvofaznoj mešavini; (b) kanali u paralelnom radu imaju manju hidrodinamičku stabilnost nego u pojedinačnom radu; (c) uzajamnost veza inercijalnih i disipativnih efekata u kompresibilnoj sredini, pri nestacionarnom strujanju dvofazne smeše, stvara uslove za pojavu nelinearnog ponašanja pojedinih kanala u

paralelnom radu i indukovanje nelinearnih oscilacija u jednom ili više kanala, iako je pri tome sistem u celini hidrodinamički stabilan.

Lokalni hidrodinamički otpori pri strujanju dvofazne smeše imaju niz osobenosti po kojima se razlikuju od lokalnih otpora koji se javljaju pri strujanju jednofaznih fluida. Određivanje zakonomernosti ovih razlika je bio razlog za eksperimentalno proučavanje hidrodinamičkog ponašanja struje dvofazne smeše pri naglom proširenju poprečnog preseka strujnog kanala. Eksperimentalni deo istraživanja obavljen je na kolu visokog pritiska. Rezultati ovih istraživanja, prikazani u magistarskom radu *Slavimira Markovića /19/*, poukazali su da pri naglom proširenju protočnog preseka struje dvofazne smeše voda-vodena para dolazi do: (a) skoka pritiska, koji raste sa porastom masenog kvaliteta i masene brzine mešavine, a opada sa porastom radnog pritiska; (b) nepovratni gubitak pritiska koji raste sa porastom masene brzine i radnog pritiska, a manji je od odgovarajućeg gubitka pritiska u jednofaznoj struji fluida; (c) rasta dužine oporavka struje dvofazne smeše sa porastom masene brzine i masenog sadržaja dvofazne smeše, a opada sa porastom radnog pritiska.

Početakom 80-tih godina izvršena je rekonstrukcija kola visokog pritiska, sa ciljem osposobljavanja za eksperimentalna proučavanja vremenski promenljivih režima strujanja dvofaznih mešavina. Važan doprinos ovih istraživanja, dat u magistarskom radu *Milana Josipovića /22/*, predstavlja eksperimentalnu potvrdu da se korelacije za određivanje koeficijenta prelaza toplote i gubitka pritiska, koje su dobijene u stacionarnim režimima, mogu koristiti samo za analizu sporo promenljivih procesa, tj. za nestacionarne režime kod kojih brzina promene parametara ne prelazi 5%/s. Za nestacionarne režime, kod kojih se parametri menjaju brzinom većom od 5%/s, mora se vršiti značajna korekcija standardnih korelacija za određivanje koeficijenta prelaza toplote i koeficijenta podužnog gubitka pritiska.

Od 90-te godine, na rekonstruisanom kolu visokog pritiska teku eksperimenti u kojima se proučavaju režimi pothlađenog ključanja tečnosti u silaznoj struji, pri malim brzinama. Osnovni cilj ovih istraživanja je nalaženje zakonomerne veze efekata prinudne i prirodne cirkulacije, u blizini njihovog izjednačavanja, na režim pothlađenog ključanja tečnosti u silaznoj struji. Neki eksperimentalni rezultati ovih istraživanja su objavljeni, a dve doktorske disertacije. nalaze se u završnoj fazi izrade.

Poslednjih decenija sve češće se razmatraju mogućnosti da se u procesima transformacije energije koriste novi, nekonvencionalni radni fluidi kao što su visoko jonizovana plazma i feromagnetni fluidi. Atraktivnost ovih fluida je u tome što se kod njih procesima prenosa mase i toplote može upravljati delovanjem spoljašnjih zapreminskih sila - polja. Imajući to u vidu, krajem 60-tih godina započeta su istraživanja reološkog ponašanja feromagnetne suspenzije, kao svojevrsnog tipa dvofazne smeše, u spoljašnjem magnetnom polju. Za potrebe eksperimentalnog dela ovih istraživanja izgrađena je eksperimentalna instalacija i razvijen je niz specifičnih mernih metoda. U istraživanjima je kao fizički model feromagnetnog fluida korišćena feromagnetna suspenzija, odnosno dvofazni tok tipa tečnost-čvrste čestice. Proučavani su efekti: hidromehaničkih interakcija čestica i nosećeg fluida; delovanja magnetnog polja, kao spoljašnje zapreminske sile na čestice; režima strujanja suspenzije i, konačno, interakcija feromagnetnih čestica. Rezultati ovih istraživanja, prikazani su doktorskoj tezi *Dušana Spasojevića /5/*, a njihov doprinos svodi se na: (a) dobijen matematički oblik zavisnosti krive toka feromagnetne suspenzije u spoljašnjem magnetnom polju, koji obuhvata: magnetna svojstva čestica; fluidomehanička svojstva nosećeg fluida i jačinu spoljašnjeg magnetnog polja; (b) određena zakonomerna veza parametara pri kojima dolazi do formiranja strukturno-porozne sredine u feromagnetnoj suspenziji i (c) eksperimentalno overen terijski model fluidodinamičkog ponašanja feromagnetne suspenzije u spoljašnjem magnetnom polju.

MATEMATIČKO MODELIRANJE DVOFAZNOG STRUJANJA

Matematičko modeliranje hidrodinamičkih i toplotnih procesa u struji dvofazne smeše predstavlja vrhunsku sintezu zakonomernosti odvijanja tih procesa i jedini način za praktično korišćenje rezultata osnovnih istraživanja u ovoj oblasti. Polazeći od ove činjenice i imajući u vidu i naše materijalne mogućnosti u eksperimentalnim istraživačkim programima, matematičko modeliranje dvofaznih strujanja imalo je još od ranih 60-tih godina značajno mesto u naučno-istraživačkim programima. Prvi rezultat ovih aktivnosti je izrada matematičkog modela grejnog kanala ključajućeg HIDIM, koji je prikazan u magistrskom radu *Valerija Jovića /11/* i matematičkog modela ključajućeg teškovođenog nuklearnog reaktora, koji je prikazan u magistarskom radu *Miroslava Mataušeka /15/*. Cilj razvijanja modela HIDIM bio je analiza hidrodinamičkog ponašanja ključajućeg kanala u kolu sa prirodnom cirkulacijom hladioca. Matematička formulacija ovog modela zasnovana je na jednačinama zakona o konzervaciji: mase, količine kretanja i energije. Osnovne pretpostavke procesa u fizičkom modelu bile su: toplotna i mehanička ravnoteža faza, strukturna homogenost dvofazne smeše, zadata korelacija za klizanje faze i jednodimenzionalnost strujanja. Korišćenjem teorije perturbacije prvog reda, jednačine modela su linearizovane, a potom, primenom Laplasove transformacije, analiza je prevedena iz vremenskog domena u domen kompleksne promenljive. Skup dobijeni linearnih diferencijalnih jednačina, za date granične i početne uslove, rešen

je numerički- metodom konačnih razlika. Parametarska analiza osjetljivosti ovog modela pokazala je da se model HIDIM dobro slaže sa raspoloživim eksperimentalnim rezultatima i sa rezultatima koje su dobili auori drugih, sličnih modela.

Dalje naše aktivnostima na matematičkom modeliranju hidrodinamičkog ponašanja struje dvofazne smeše bile su usmerene na uvođenje novih modela fizičkih procesa, a ne samo numeričko rešavanje dobijenog skupa jednačina, praktično, isog fizičkog modela procesa. Ovo je omogućilo da se dođe do predviđanja ponašanja parametara struje dvofazne smeše u zadatim uslovima, bez neposrednog numeričkog rešavanja skupa jednačina matematičkog modela, što je prikazano u magistarskom radu *Dušana Spasojevića* /14/, u kome su određivane vrednosti parametara isparivačkog kanala u kolu sa prirodnom cirkulacijom hladioca na granici hidrodinamičke stabilnosti. Pri tome su jednačine zakona o konzervaciji napisane u sistemu centra mase, pa je iz njih, transformacijama dobijena jednačina za prostiranje talasa koncentracije u ključajućem delu grejnog kanala. Uvođenjem pretpostavke da u isparivačkom kanalu, u kolu sa prirodnom cirkulacijom hladioca, pojava hidrodinamičke nestabilnosti nastaje pri interferenciji prostiranja talasa entalpije u konvektivnom delu i njime izazvanog talasa koncentracije u ključajućem delu kanala, omogućeno je određivanje minimalnog toplotnog opterećenja na granici hidrodinamičke stabilnosti. Rezultati dobijeni na osnovu ovog modela dobro su se slagali sa raspoloživim eksperimentalnim rezultatima drugih autora.

Jedan od prvih radova "novog talasa" matematičkog modeliranja ponašanja dvofaznog strujanja u dijabatskom kanalu je model termohidrauličkog ponašanja grejnog kanala u poremećenim uslovima. Ovaj model, koji je prikazan u magistarskom radu *Jovice Riznića* /21/, zasniva se na četiri jednačine zakona o konzervaciji: mase smeše, mase gasne faze, količine kretanja i energije smeše. Omogućava razmatranje strukturne i kinematske heterogenosti dvofazne smeše, kao i termodinamičke neravnoteže faza. Na osnovu velikog broja numeričkih eksperimenata, izveden je zaključak o značaju adekvatnog izbora relacija i parametara dobijenih u fizičkim eksperimentima koji se uvode u cilju matematičkog "zatvaranja" modela. Pri tome se posebno ističu: relacija za raspodelu generisanja gasne faze, korelacija za relativno kretanje faza i dvofazni mnočitelj podučnog pada pritiska.

Značaj adekvatnosti izbora konstitutivnih relacija i njihov uicaj na valjanost modela u celini, razmatran je u doktorskoj tezi *Jovice Riznića* /8/. U okviru koje je izvršeno matematičko modeliranje procesa isparavanja tečnosti u adijabatskim uslovima, pri intenzivnoj dekompresiji. Intenzitet isparavanja zagrejjane tečnosti, u ovim uslovima zavisi od efekta "generisanja" površine između faza, odnosno intenziteta razmene toplote između faza. Zbog toga je u ovom modelu posebna pažnja posvećena analizi mehanizma nastanka i određivanja veličina početne koncentracije međufazne površine. Korišćenjem teorije nukleacije mehurova na zidovima kanala i mehanizma heterogene nukleacije na okvašenoj površini kanala i postavljene su bilansne jednačine za održavanje broja mehurova pare u struji dvofazne mešavine. Na ovaj način se prvi put, u dostupnoj literaturi, matematički modeliraju veze između "ponašanja" gustine mehurova i brzine generisanja parne faze u neravnotežnim uslovima isparavanja tečnosti pri pojavi intenzivne dekompresije.

Polazeći od stohastičke prirode varijacije parametara u dvofaznom toku, poslednjih godina je započeto razvijanje determinističkih i stohastičkih metoda za identifikaciju režima strujanja zasnovana na kompleksnosti toka koja je definisana preko teorije informacija /36, 38, 39/.

TEHNOLOŠKA PRIMENA REZULTATA ISRAŽIVANJA

Istraživanja prenosa mase i toplote u dvofaznim smešama bila su tehnološki ciljno osmišljena. U ranim perioiama rada u ovoj oblasti, to su bili zahtevi koji su poticali, kao i u drugim zemljama, u to vreme, iz potreba razvojnog nuklearno energetskog programa. Međutim, poslednjih dvadesetak godina došlo je do široke primene energetski intezivnog dvofaznog toka, tako da se, naprimer, projektovanje i pogon savremenih termoenergetskih postrojenja, a naročito upravljanje njima i siguran rad zasniva na korišćenju vrhunskih znanja procesa prenosa mase i toplote u dvofaznom toku.

Dok su sredinom 60-tih godina istraživanja fenomena prenosa u dvofaznom toku bila skoro u potpunosti vezana za projektne studije nuklearnih elektrana sa ključajućim reaktorima /15, 57, 60, 62, 69/. Kasnije, sa promenom odnosa prema nuklearno-energetskom programu, prateći tokove svetska zbivanja u ovoj oblasti, aktivnosti su bile orijentisane na rešavanje termohidrauličkih problema klasičnih termoenergetskih postrojenja. Tako da je već sredinom 70-tih godina, započeto je proučavanje efekata promene režima ključanja vode u ekranskim cevima kotla na termomehaničko naprezanje i pojavu oštećenja cevni sistema /68, 69, 72/. Poseban praktičan značaj ima primena stečenih znanja u analizi uzroka oštećenja cevni sistema generatora pare, u kojima je pored ostalog pokazano da efekat distorzije dvofaznog toka može biti uzrok oštećenja cevi /69, 72/.

Najveći deo tekućeg eksperimentalnog programa istraživanja u ovoj oblasti, koji je zadržao nuklearno usmerenje, vezan je za istraživanje fenomena koji predstavljaju osnovu za analizu sigurnosti rada nuklearnih elektrana VVER-tipa, koje su izgrađene u neposrednom okruženju naše zemlje.

ZAKLJUČAK

Zaključci i poruke proistekli iz dosadašnjeg istraživanja procesa ključanja i dvofaznog strujanja u našoj Laboratoriji, mogu se, u sažetom obliku, iskazati na sledeći način

- Četrdesetogodišnja istraživanja u ovoj oblasti imala su zapažene naučno-stručne rezultate koji su izraženi pre svega u: velikom broju publikovanih radova vrhunskog naučnog nivoa; formiranim naučno-istraživačkim centarima, a pre svega Laboratorije za termotehniku i energetiku Instituta u Vinči i Katedre za termoenergetiku Mašinskog fakulteta u Beogradu; razvijenim brojnim eksperimentalnim metodama za proučavanje i dijagnostiku procesa u dvofaznom toku; razvijenim brojnim matematičkim modelima i računarskim programima za simulaciju pojava u dvofaznom toku.
- Postoje inicijative da se u narednom periodu obnovi, proširi, unapredi i osavremeni eksperimentalna infrastruktura za istraživanja u ovoj oblasti, jer su imajući u vidu prirodu ove naučne oblasti, sa jedne i dostignuti nivo matematičkog modeliranja sa druge strane dostignute granice pouzdanog poznavanja fizičkih zakonomernosti procesa, koje nameću potrebu za novim, eksperimentalno overenim znanjima.
- Perspektiva ove naučne oblasti zavisi od motivisanosti mladih stručnjaka da se opredele za rad u njoj i u našoj zemlji. Nažalost, poslednjih godina došlo je do velikog i neželjnog odliva mladih kadrova.
- Postoje potrebe da se rad na proučavanju hidrodinamičkog i toplotnog ponašanja dvofaznog toka nastavi i unapredi, jer bi se time na najefikasniji način obezbedila naučno-stručna podrška projektovanju, gradnji, pogonu i održavanju termoenergetskih postrojenja. U tome je vrlo značajno da se ostvari još intenzivnija saradnja naučno-istraživačkih instituta, fakulteta, elektroprivrednih organizacija, projektantskih organizacija i mašinogradnje energetske opreme .

CITIRANI RADOVI - IZVOD IZ SPISKA OBJAVLJENIH RADOVA

1. Miodrag Novaković: *Pressure Drop and Heat Transfer for Water-Steam Mixture Flowing in a Tube*,
2. Ph. D. Thesis, London University, Queen Mary College, 1959.
3. Naim Afgan: *Prenos toplote ključanjem i toplotni fluks pregorevanja smeša etilalkohol-benzol*, Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, 1965.
4. Nenad Kondić: *Difuziono izdvajanje mikro-čestica iz adijabatskog toka fluida*, Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, 1965.
5. Ljubomir Jovanović: *Određivanje strukture dvofaznog toka pri ključanju smeše voda-para visokog kvaliteta u prinudnoj struji*, Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, 1972.
6. Dušan Spasojević: *Prilog poznavanju reološke karakteristike feromagnetne suspenzije u magnetnom polju*, Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, 1974.
7. Miodrag Stefanović: *Analiza fluktuacija temperature u dvofaznom toku pri pothlađenom ključanju*, Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, 1975.
8. Milovan Studović: *Adijabatsko isparavanje tečnosti*, Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu,
9. Mašinski fakultet, 1982.
10. Jovica Riznić: *Generacija parne faze u neravnotežnim uslovima*, Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, 1989.
11. Valerije Jović: *Prilog proučavanju nestacionarnih strujanja dvofazne smeše voda-vazduh u paralelnim kanalima*, Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, 1992.
12. Stanimir Lazić: *Pregrejanje tečnih kapi*, Magistarski rad, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, 1966.
13. Valerije Jović: *Model hidrodinamičkog ponašanja reaktorskog kanala sa dvofaznim tokom u prirodnoj cirkulaciji*, Magistarski rad, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, 1967.
14. Ljubomir Jovanović: *Dinamika rasta mehura pri ključanju*, Magistarski rad, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, 1969.
15. Miodrag Stefanović: *Pregrejanje tečnosti i prenošenje toplote ključanjem sa idealno glatke površine*, Magistarski rad, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, 1969.
16. Dušan Spasojević: *Minimalno toplotno opterećenje isparivačkog kanala na granici stabilnosti parametara*, Magistarski rad, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, 1970.
17. Miroslav Mataušek: *Nelinearni model za dinamičku analizu reaktora BWR tipa sa prirodnom cirkulacijom rashladnog fluida*, Magistarski rad, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, 1970.
18. Milan Dimić: *Istraživanje fenomena prenosa pri ključanju binarnih smeša na atmosferskom pritisku*, Magistarski rad, Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, 1970.
19. Mića Marić: *Fluktuacija temperature u dvofaznom graničnom sloju pri ključanju rastvora voda-etilalkohol*, Magistarski rad, Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, 1970.

20. Vladimir Valent: *Dinamika rasta mehura i analiza prenosa toplote ii mase pri ključanju smeša etilalkohol-voda*, Magistarski rad, Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, 1971.
21. Ejup Ganić: *Rast i otklanje mehura pri mehurastom ključanju*, Magistarski rad, Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, 1972.
22. Slavimir Marković: *Analiza promene pritiska usled naglog proširenja preseka kanala u prinudnom strujanju smeše para-voda*, Magistarski rad, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, 1974.
23. Larisa Jović: *Razvoj metode uslovnog sempliranja fluktuacije temperature u pregrejanom sloju ključajuće tečnosti*, Magistarski rad, Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet, 1978.
24. Jovica Riznić: *Termohidrauličko ponašanje grejnog kanala vodovodenog reaktora u poremećenim uslovima*, Magistarski rad, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, 1983.
25. Milan Josipović: *Prilog proučavanju strujnotermičkih procesa u uslovima poremećaja strujanja nosica toplote u grejnom kanalu*, Magistarski rad, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, 1991.
- Novaković, M. Stefanović: *Boiling from Mercury Surface*, Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 7, 1964.
26. Lj. Jovanović, M. Novaković, M. Stefanović: *High Speed Cinephotography of Alcohol Boiling from a Mercury Surface*, IBK Bulletin, Vol. 6, No. 2, pp. 89-100, 1965.
27. Pišlar, Lj. Jovanović: *Design and Operation of a Burnout Detector with Thyristor*, IBK Bulletin, Vol. 20, Nuclear Engineering No. 5, pp. 29-32, 1969.
28. Lezin, V. Jović: *Nekotorye voprosy ustojchivosti v parallelniyh kanalakh*, Trudy Moskovskogo Energeticheskogo Instituta, Seriya: Teploenergetika, Moskva, str.14-21, 1969.
29. M. Ristić: *A Proposal for a New Experimental Investigation on the Vapor Bubble Growth Dynamics*, (Lettre to the editor), Fizika 3, 1971.
30. N. Afgan, M. Stefanović: *Liquid Superheat for Vapor Formation with and without Presence of Solid Surface*, Int. J. Water Desalination, No. 10, 1971.
31. N. Afgan, M. Stefanović, Lj. Jovanović, V. Pišlar: *Determination of the Statistical Characteristics of Temperature Fluctuation in Pool Boiling*, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 16, pp. 249-286, 1973.
32. N. Afgan, M. Stefanović, Lj. Jovanović, V. Pišlar: *An Approach to the Analysis of Temperature Fluctuation in Two-Phase Flow*, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 16, pp. 187-194, 1973.
33. N. Afgan: *Analysis of Temperature Fluctuation in Pool Boiling*, Z. Prikl. Mekh. i Tekn. Fiz., Vol. 5, No 5, 1973.
34. E. Ganić and N. Afgan: *An Analysis of Temperature Fields in the Bubble and in its Liquid Environment in Pool Boiling Water*, Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 18, pp. 301-309, 1973.
35. D. Spasojević, T.F. Irvine, N. Afgan: *The Effect of The Magnetic Field on The Rheodynamic Behavior of Ferromagnetic Suspensions*, Int. J. Multiphase Flow, Vol. 1, pp. 607-622, 1974.
36. N. Afgan: *Boiling Liquid Superheat*, Advances in Heat and Mass Transfer, Vol.11, pp. 1-49, 1975.
37. D. Ristić: *The Chance in Phase of a Considered as Composed of Molecule Cluster*, Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 20, pp. 15-21, 1977.
38. J. Riznić, M. Ishii: *Bubble Number Density and Vapor Generation in Flashing Flow*, Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol 32, No 10, pp. 1822-1833, 1989.
39. V. Jović, N. Afgan, L. Jović: *Issledovanie neustochivosti dvufaznogo potoka v parallelnykh kanalakh*, Inzhenerno-Fizicheskij Zurnal, Minsk, Belorusia, Vol. 68, No 5, str.707-719, 1994.
40. M. Rajković, J. Riznić and M. Ishii: *Spatio Temporal Complexities and Chaos in Two-Phase Flow*, Nuclear Engineering and Design, Vol. 49, No 1, pp. 53-66, 1994.
41. M. Rajković, J. Riznić, M. Ishii: *Chaos in Two-Phase Flows*, Int. J. of Heat Technology, Vol. 14, No 1, 1996.
42. M. Novaković, M. Stefanović: *Boiling from a Liquid Interface*, Treća ženevska konf. o nuklearnoj energiji, separat: A Conf. 28/ p. 699, Geneve, 1964.
43. M. Novaković, M. Stefanović, Lj. Jovanović, N. Ninić: *Nucleation from a Mercury Surface*, Proc. of III Int. Heat Trans. Conf., Vol. III, pp. 212-219. Chicago, 1966.
44. M. Stevanović, N. Ninić: *Issledovanye predelnogo peregreva žitkosti*, III Vsesojuznoe Soveščtenie po teplo-massobmenu, Zb. trudov: Teplo-massoobmen, Tom 2. pp. 288-297, Minsk, 1968.
45. V. Pišlar, M. Stefanović, Lj. Jovanović: *Determination of Micro-Thermocouple Dynamics Characteristics*, Proc. of Int. Seminar on Heat and Mass Transfer, Herceg Novi, 1969.
46. A. Vehauc, S. Zarić, N. Afgan, V. Jović, D. Spasojević: *Efect of Compresibility on Transfer Function of Two-Phase Flow*, Proc. of III Congress CHISA, Marijanske Lazne, 1969.
47. M. Stefanović, N. Afgan, V. Pišlar, Lj. Jovanović: *Experimental Investigation of the Superheated Boundary Layer in Forced Convection Boiling*, Proc. of IV Int. Heat Transfer Conf., Vol. V, B.4.12, Paris, 1970.
48. N. Afgan, M. Stefanović, M. Dimić: *Boiling Heat Transfer of Binary Mixtures from Ideally Smooth Surface*, Proc. of Int. Symp. on Two-Phase Systems, Haifa, 1971.

49. V. Jović, L. Jović, M. Jorović, N. Afgan: *Eksperimentalnoe opredelenie peredaatochnyh funkcij treh paralelnyh kanalov s dvuhfazovym techeniem*, IV Vsesoyuznoe soveschnie po teplo-massoobmenu, Zb. trudov: Teplo-massoobmen, tom 9, chast II, str. 546-565, Minsk, 1972.
50. M. Studović, M. Ristić: *Vapor Phase Evolution in an Adiabatic Water flow*, IV Vsesoyuznoe soveschnie po Teplo-massoobmenu, Zb. trudov: Teplo-massoobmen, tom 9, chast II, str. 531- 545, Minsk, 1972.
51. V. Jović, L. Jović, N. Afgan: *A Identification of Dynamic Characteristics in Two-Phase Air--Water Parallel Channel Flow*, Proc. of V Int. H. Trans. Conf., Vol. IV, pp. 230-236, Tokio, 1974.
52. M. Stefanović: *New Analytical Model for Predicing the Suerheating in a Vicinity a Solid Surface*, Proc. of V. Int. Heat Transfer Conference, pp. 320-324, Tokio, 1975.
53. D. Spasojević, N. Afgan: *Relogicheskya karakteristka Ferromagnitnoy suspenzii v magnetnom pole*, Zb. rab. Vsesoyuznoy konf. po Telomassoobmenu, tom. 7, str. 3-18, Minsk, 1976.
54. J. Riznić, D. Spasojević, M. Josipović, V. Jović: *An Iterative Numerical Method for Non-Equilibrium Two-Phase Flow*, Proc. of III Int. Conf.on Num. Meth. for Non-Linear Problems, Dubrovnik, 1986.
55. J. Riznić, D. Spasojević, V. Jović: *Drift-flux model strujanja dvofaznog nosica toplote*, XII jug. kongres teor. i prim. mehanike, Zb. radova, knj. B-mehanika fluida, str.31-36, Zadar, 1986.
56. V. Jović, D. Spasojević, L. Jović, M. Josipović: *Eksperimental'noe issledovanie teplovih i gidrodinamicheskikh karakteristik dvuhfaznih techenij*, Teplofizika '90, str. 173-182, Obninsk, 1990.
57. D. Spasojević, L. Jović, M. Josipović, V. Jović, N. Dinić: *Experimental Study of Unsteady Subcooled Flow Boiling in Vertical Channels*, Proc. of III Workshop an CANDU and Advanced Reactor Thermohydraulics, Hamilton, Canada, pp. 59-64, 1990.
58. V. Jović, N. Afgan, L. Jović, D. Spasojević: *An Experimental Study of the Pressure Drop Oscilations in Three Parallel Channel Two-Phase Flow*, Proc. of X Int. Heat Transfer Conf., Vol. VI. pp. 193-198, Brighton, 1994.
59. V. Jović, L. Jović, N. Afgan: *Dynamic of Two-Phase Flow in Tree Parallel Channels*, Proc. of European Two-Phase Group Meeting, Milan, Piacenza, pp. 284-291, 1994.
60. M. Rajković, J. Riznić, M. Iishii: *Identification of Flow Regimes in Two-Phase Flows*, Proc. of Nat. Heat Transfer Conf., Atlanta, Georgia, USA, pp. 197-202, 1993.
61. V. Jović, M. Stefanović: *Proračun temperaturskog polja, kontrola pregorevanja i distribucija šupljina u reaktoru BWR tipa*, Publikacija IBK-355, Beograd -Vinča, 1965.
62. M. Studović, Lj. Jovanović: *Trozoni metod proračuna energetskog teškovodnog reaktora sa ključajućim rashlađivačem*, Monografija IBK, (nagrada "Kolubara 1966"), Beograd- Vinča, 1966.
63. D. Spasojević, V. Jović, S. Zarić, N. Afgan: *Hidrodinamički model ključajućeg kanala-HIDIM*, Zbornik radova III Simp. JDT, Zagreb, 1966.
64. P. Anastasijević, Lj. Jovanović, V. Pišlar, V. Jovašević: *Eksperimentalno kolo visokog*, Zbornik radova III Simp. JDT, Zagreb, 1966.
65. M. Studović: *A Model for Loss of Coolant Accident Analysis (CER)*, AE Rep. RTV-740, Stokholm, 1968.
66. A. Vehauc, S. Zarić, V. Jović, D. Spasojević: *Effect of Compressibility on Transfer Function of Two- Phase Flow*, Proc. of III Int. Congress CHISA, Marianske Lazne, pp. 91-98,1968.
67. Z. Zarić A. Vehauc, V. Jović, D. Spasojević, N. Afgan: *Kolo za hidrodinamičke eksperimente u dvofaznom toku*, Publikacija IBK-675, Beograd- Vinča, 1969,
68. D. Spasojević, A. Vehauc, S. Zarić, V. Jović, N. Afgan: *Neravnotežni termomehanički model strujanja u ključajućem kanalu*, Publikacija IBK-791, Beograd- Vinča, 1969.
69. M. Studović: *Pressure Transient in a Dry Containment*, AB-RTV-745, AB Atomenergy, Stokholm, 1969.
70. N. Afgan, V. Jović, L. Jović, S. Zarić *Ispitivanje uzroka prskanja cevi bloka 2 termoelektrane "N. Tesla"- Obrenovac*, Publikacija IBK-LTFT-171, Beograd-Vinča, 1978.
71. N. Afgan, V.A. Vares, V. Jović *Determination of the Temperature Field and Thermal Stress in Boiler Screen Tubes Placed in Subcooled Boiling Zone*, Zb. radova IBK-Vinča i Politehn. Inst.-Talin, str. 79-92 Beograd, 1980.
72. N. Afgan, D. Spasojević, V. Jović, S. Milojević, J. Riznić, Z. Stošić: *Termodinamički i hidrodinamički problemi u vezi sa sigurnošću nuklearnih elektrana*, Monografija IBK, Beograd-Vinča, 1981.
73. D. Spasojević V. Jović: *Analiza sigurnosti nuklearnih elektrana*, Monografija IBK, Beograd -Vinča, 1982.
74. Afgan, P. Radovanović B. Brajušković: *Istraživanje uzroka pucanja cevi u komori ložišta kotla IV bloka TE "Kakanj"*, Završni izveštaj, IBK-ITE-418, Beograd-Vinča, 1983.