

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата **Дарка Јаћимовског**, дипл. инж. технологије.

Одлуком бр. 35/197 од 01.06.2017. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата **Дарка Јаћимовског**, дипл. инж. технологије под насловом:

„Дисконтинуални гранични слој и аналогиије преноса у пакованим, флуидизованим и транспортним системима течност-честице“.

После прегледа достављене Дисертације и других пратећих материјала и разговора са Кандидатом, Комисија је сачинила следећи

РЕФЕРАТ

1. УВОД

1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

31.05.2015. Кандидат **Дарко Јаћимовски**, дипл. инж. технологије пријавио је тему докторске дисертације под називом „**Дисконтинуални гранични слој и пренос количине кретања, топлоте и масе у системима течност честице**“. Наставно-научно веће Технолошко-металуршког факултета, Универзитета у Београду је дана 07.05.2015. усвојило састав Комисије за оцену научне заснованости предложене теме.

04.06.2015. на седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета, на основу извештаја Комисије, донета је Одлука о прихватању предлога теме докторске дисертације **Дарка Јаћимовског**, дипл. инж. технологије, под измењеним насловом „**Дисконтинуални гранични слој и аналогиије преноса у пакованим, флуидизованим и транспортним системима течност-честице**“. За менторе ове докторске дисертације именоване су Др Невенка Бошковић Враголовић, редовни професор Технолошко металуршког факултета и Др Радмила Гарић Груловић, научни саветник Института за хемију, технологију и металургију .

06.07.2015. на седници Већа научних области техничких наука Универзитета у Београду дата је сагласност на предлог теме докторске дисертације **Дарка Јаћимовског**, дипл. инж. технологије, под називом „**Дисконтинуални гранични слој и аналогиије преноса у пакованим, флуидизованим и транспортним системима течност-честице**“.

01.06.2017. на седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета, донета је одлука о именовању чланова комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације **Дарка Јаћимовског**, дипл. инж. технологије, под називом „**Дисконтинуални гранични слој и аналогиије преноса у пакованим, флуидизованим и транспортним системима течност-честице**“.

1.2. Научна област дисертације

Истраживања у оквиру ове докторске дисертације припадају научној области Технолошко инжењерство, ужа научна област Хемијско инжењерство за коју је Технолошко-металуршки факултет Универзитета у Београду матична установа.

Ментори ове докторске дисертације су Др Невенка Бошковић Враголовић, редовни професор Технолошко металуршког факултета и Радмила Гарић Груловић, научни саветник Института за хемију, технологију и металургију.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Дарко Јаћимовски је рођен 28.11.1977. године у Панчеву, где је завршио основну и средњу Електротехничку школу „Никола Тесла“ смер електроника. Технолошко-Металуршки факултет у Београду уписао је 1996 године и дипломирао 2010 године на одсеку за хемијско-инжењерство са просечном оценом 8.08 и оценом 10 на дипломском раду са темом: „Пренос количине кретања, масе и топлоте при вертикалном транспорту у систему течност-честице“. На истом факултету школске 2010/2011 године уписао је докторске студије на студијском програму Хемијско инжењерство.

Током 2010. године радио је у индустрији скроба „Јабука“ у Панчеву. Од 2011 године запослен је у Институту за хемију технологију и металургију – Центар за катализу и хемијско инжењерство. На разним истраживачким пословима и пројектима радио је почевши као истраживач приправник, а од 2013 као истраживач сарадник, на истраживањима основних наука и примењеним истраживањима.

Тренутно је ангажован на пројектима: Основних истраживања "Развој ефикаснијих хемијско-инжењерских процеса заснован на истраживањима феномена преноса и принципима интензификације процеса" и међународне (билатералне) сарадње са Бугарском Академијом Наука: „Development of advanced catalytic systems applicable to chemical and photochemical processes for neutralization of environmental pollutions“.

Објавио је 5 радова у часописима међународног значаја и 8 саопштења на скуповима међународног и домаћег значаја, од тога 2 на међународним и 6 на домаћим скуповима.

Служи се руским и енглеским језиком.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација кандидата Дарка Јаћимовског, дипл. инж. технологије: „Дисконтинуалан гранични слој и аналогije преноса у пакованим, флуидизованим и транспортним системима течност-честице“, написана је на 235 страна, укључује: 33 табеле, 102 слике, као и 301 литературна навода. Докторска дисертација садржи следећа поглавља: *Увод, 1. Теоријске основе и преглед досадашњих истраживања; 2. Експериментална испитивања преноса количине кретања, масе и топлоте; 3. Резултати и дискусија; Закључак, Прилог*

У докторској дисертацији Дарка Јаћимовског урађена је детаљна анализа формирања граничних слојева у хетерогеним системима течност-честице са акцентом на формирање дифузионог граничног слоја и постављен је теориски модела за одређивање коефицијента прелаза масе у флуидизованим слојевима. У циљу добијања основних преносних карактеристика пакованих и флуидизованих слојева и транспортних система, као и провере самог постављеног модела у оквиру овог рада извршен је велики број експерименталних

испитивања. При томе су конструисани различити експериментални системи и уз помоћ различитих техника одређивани коефицијенти преноса. У овој дисертацији постављена је и аналогија преноса количине кретања масе и топлоте у партикулативно флуидизованим слојевима која се ослања на постављени модел.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

Уводно поглавље даје сажет приказ анализираних проблематике ове докторске дисертације, објашњава предмет рада, као и основне циљеве рада.

У првом поглављу *Теоријске основе и преглед досадашњих истраживања*, дата је теоријска основа анализе континуалног и дисконтинуалног граничног слоја која садржи структуре граничних слојева са основним једначинама везаним за дебљине граничних слојева и расподеле концентрација величина које се преносе. У овом поглављу се налазе и основне карактеристике пакованих и флуидизованих слојева као и вертикалног хидрауличног транспорта и литературне аналогије преноса при једнофазном струјању и у хетерогеним системима.

У другом поглављу *Експериментална испитивања преноса количине кретања, масе и топлоте* дати су сви коришћени експериментални системи за: пренос масе у пакованим слојевима, пренос масе и топлоте у флуидизованим слојевима са и без хемијске реакције, пренос масе и топлоте при вертикалном транспорту. Пренос количине кретања испитиван је у свим системима. Дат је уз одговарајући систем и опис технике коришћене при специфичним мерењима као што су метода растварања и електрохемијска метода за одређивање коефицијената прелаза масе и пренос топлоте са загрејаног зида на флуид у циљу одређивања коефицијената прелаза топлоте.

У трећем поглављу *Резултати и дискусија* дати су у првом реду резултати испитивања у облику зависности добијених коефицијената трења, коефицијената прелаза масе и коефицијената прелаза топлоте у свим испитиваним системима од основних флуидодинамичких услова у системима: брзине флуида и порозности слојева. У овом поглављу централно место заузима теоријски постављен модел граничног слоја у дисперзним системима на основу кога се могу израчунати коефицијенти прелаза масе и топлоте и његова верификација у флуидизованим и пакованим слојевима и при вертикалном транспорту честица. На основу експериментално добијених резултата и модела постављена је и аналогија преноса количине кретања, топлоте и масе у флуидизованим системима. У оквиру овог поглавља дати су резултати преноса масе у системима са хемијском реакцијом као системи за потенцијалну практичну примену добијених резултата.

У *Закључку* овог рада сумирани су сви резултати добијени у овој докторској дисертацији.

На крају рада дат је *Прилог* у виду табеларних приказа мерених параметара и свих израчунатих величина анализираних у овом раду.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Гранични слој представља највећи отпор преносу количине кретања, топлоте и масе и самим тим мора бити узет у обзир у свим системима у којима постоји контакт између чврсте површине и флуида који струји. Познавањем карактеристика граничних слојева у различитим системима, омогућава да се лакше дефинишу преноси, а на основу тога и пројектују

различити технолошки процеси. Посебан проблем постоји када су у току флуида присутне чврсте честице које својим присуством мењају гранични слој (мењају дебљину, прекидају континуитет) формирајући на зидовима колоне и око самих честица дисконтинуални гранични слој. Литературни подаци до сада објављени у научној јавности обилују експерименталним корелацијама за пренос количине кретања, топлоте и масе, али је мало радова који покушавају да феноменолошки објасне утицај граничног слоја на преносе у вишефазним системима.

Предмет овог рада је управо повезивање карактеристика граничног слоја са преносом количине кретања, топлоте и масе, са акцентом на аналогije између ових преноса. Феноменолошким приступом овој проблематици, даје се допринос који би олакшао теоријско разматрање вишефазних система течност-честице (паковани слој, флуидизовани слој, вертикални транспорт), који су изузетно сложени, а с обзиром на актуелност њихове примене при интензификацији процеса захтевају даља истраживања.

На основу прелиминарно добијених резултата истраживања у различитим хетерогеним системима показало се да се у анализи свих система може применити јединствени приступ. Оваквим јединственим приступом хетерогеним системима пројектовање уређаја у процесној индустрији било би значајно поједностављено без обзира да ли су они гравитациони, ротациони, адсорпциони, флуидизовани итд. и да ли се у њима одвија пренос количине кретања, топлоте и масе или више њих истовремено.

Савременост и оригиналност истраживања приказаних у овој докторској дисертацији потврђени су публикавањем три рада из тезе у међународним часописима.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Током израде докторске дисертације кандидат је извршио преглед научне и стручне литературе из области: теорије граничног слоја; општих карактеристика пакованих, флуидизованих и транспортних система; преноса количине кретања, масе и топлоте у различитим дисперзним системима. Коришћена литература се већим делом састојала од релевантних књига из области Феномена преноса и Теорије граничног слоја, као и од научних радова публикованих углавном у водећим међународним часописима. Тиме је кандидат стекао широк увид у проблематику овог рада чиме је добио теоријску основу касније постављеног модела. Поред тога на основу до сада објављених радова из релевантних области кандидат је осмислио и поставио експерименталне системе из чијих су резултата испитивања добијени кључни параметри за анализирање и поређење.

У овој докторској дисертацији укупно је наведено 301 референца, које првенствено обухватају преносе количине кретања, масе и топлоте у дисперзним системима течност-честице, као и друге области хемијског инжењерства од значаја за испитиване процесе.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

За извођење експерименталног дела истраживања у овој докторској дисертацији коришћени су различити системи:

- стандардне колоне различитих пречника са омотачем или без омотача, са пакованим, флуидизованим и транспортним системима у циљу добијања параметара за коефицијенте преноса количине кретања, масе и топлоте;
- сегментиране колоне са флуидизованим честицама у циљу добијања параметара на које утиче дебљина граничног слоја

Притисак, температура и проток су мерени класичним уређајима. Највећи број мерења је извршен у циљу одређивања коефицијената прелаза масе коришћењем:

- методе растварања тј. праћења промене масе супстанце у условима ниског флукса (растварање слабо растворне супстанце) са зида на флуид у флуидизованим и транспортним системима и са уроњене сфере на флуид у пакованим слојевима
- електрохемијске методе тј. праћење јачине струје при одвијању дифузионо контролисане електрохемијске реакције у партикулативно флуидизованим слојевима.

Експерименти преноса топлоте у флуидизованим и транспортним системима рађени су у колонама са омотачем кроз који је пропуштана zasiћена водена пара на атмосферском притиску за загревање зида колоне и на основу добијених података одређиван је коефицијент прелаза топлоте зид-флуид.

Сва експериментална мерења су извршена у широком опсегу хидродинамичких услова: брзина струјања флуида, величина честица чврсте фазе и порозности слојева.

У математичкој обради добијених експерименталних резултата коришћене су стандардне статистичке методе обраде података, као и методе корелисања добијених резултата.

3.4. Применљивост остварених резултата

Новим приступом анализи формирања граничних слојева у дисперзним системима базиран на концепту прекидања граничног слоја од судара до судара, изведене су једначине за одређивање дебљине дифузионог и термичког граничног слоја у партикулативно флуидизованим слојевима. С обзиром да дебљина граничног слоја директно одређује и коефицијенте преноса на основу добијених израза постављене су корелације за израчунавање коефицијената, критеријума и фактора преноса масе и топлоте. Добијени резултати у флуидизованим слојевима верификовани су у пакованим слојевима и при вертикалном транспорту.

Овако добијени резултати омогућили су одређивање фактора преноса масе и топлоте у стању минималне флуидизације и при брзини одношења чиме је допуњена постојећа аналогија преноса количине кретања, масе и топлоте у нормализованој форми. Поред великог фундаменталног значаја који има постављена аналогија у партикулативно флуидизованим слојевима свој практични значај има у томе што се на основу једног познатог коефицијента преноса друга два могу директно проценити, што у многеме олакшава пројектовање уређаја и процеса са дисперзним системима течност-честице.

Посебно, из зависности добијених за пренос топлоте у партикулативно флуидизованим слојевима постављена је једначина која решава питање порозности слоја за максималну вредност коефицијента прелаза топлоте као и једначина за одређивање максималне вредности поменутог коефицијента. Код процеса у којима постоји загревање или хлађење флуидизованог слоја од посебног је практичног значаја могућност одређивања управо максималне вредности коефицијента прелаза и услова под којима се то дешава.

Још један значајан практични резултат добијен у овом раду је добијен при испитивањима преноса масе у партикулативно флуидизованим слојевима са хемијском реакцијом. На основу одређеног фактора увећања због присутне хемијске реакције и аналогије постављене у таквим условима створена је основа за ефикасније пројектовање реактора са флуидизованим слојем који се најчешће користе у области бихемијског инжењерства или при третману вода у оквиру инжењерства заштите животне средине.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Кандидат Дарко Јаћимовски је од 2011 године запослен је у Институту за хемију технологију и металургију – Центар за катализу и хемијско инжењерство где ради на

истраживачким пословима и пројектима почевши као истраживач приправник, а од 2013 као истраживач сарадник, на истраживањима основних наука и примењеним истраживањима у следећим областима:

- Феномени преноса количине кретања, масе и топлоте у пакованим, флуидизованим и транспортним системима течност-честице;
- Одређивања аналогичности преноса у дисперзним системима;
- Теорије граничних слојева у дисперзним системима;
- Изучавања контактора флуид-чврста фаза у циљу идентификације процеса.

У току израде докторске дисертације по називом „**Дисконтинуални гранични слој и аналогичности преноса у пакованим, флуидизованим и транспортним системима течност-честице**“, кандидат је исказао стручност и самосталност у свим фазама израде тезе, пружајући значајан научни допринос у проучавању граничног слоја у дисперзним системима, са чиме је у вези дефинисање коефицијената и аналогичности преноса у истим системима. На основу изнетих чињеница, Комисија је мишљења да је кандидат квалификован и да поседује све квалитете који су неопходни за самосталан научно истраживачки рад.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

Докторска дисертација кандидата Дарка Јаћимовског, дипл.инж.технологије пружа значајан научни допринос на пољу фундаменталних и практичних знања из области теорије граничног слоја, преноса количине кретања, масе и топлоте и аналогичности преноса у флуидизованим, пакованим и транспортним системима. Научни доприноси ове докторске дисертације су:

- Развијен је теоријски модел за пренос масе и топлоте заснован на анализи дисконтинуалног граничног слоја. Овај модел представља фундаментални научни допринос разумевању феномена преноса у хетерогеним системима у којима је континуална фаза течност;
- На основу модела развијене су једначине за корелисање коефицијената прелаза масе и топлоте, Шервудовог и Нуселтовог броја и фактора преноса масе и топлоте у партикулативно флуидизованим слојевима;
- Експериментално су одређени коефицијенти прелаза масе и топлоте у више експерименталних система (пакован, флуидизован слој и транспортни систем) и међусобно су упоређени резултати.
- Успостављена је аналогичност међу преносима количине кретања, топлоте и масе у партикулативно флуидизованим слојевима заснована на моделу граничног слоја. Такође је постојећа аналогичност у флуидизованом слоју, дата на основу нормализованих коефицијената преноса, између преноса масе и количине кретања проширена на аналогичност сва три преноса
- Експериментална испитивања у партикулативно флуидизованом слоју са дифузионо контролисаном хемијском реакцијом дају двојаки допринос: одређивање фактора увећања преноса због присутне хемијске реакције и успостављање аналогичности у таквим системима.
- Развијени модели у овом раду успешно би се могли користити при пројектовању хетерогених система течност-честице у циљу интензификације процеса.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Феномени преноса су неоспорно кључна област Хемијског инжењерства која чини основу свих процеса хемијске индустрије. С друге стране дисперзни системи, који су предмет испитивања у овом раду, чине велики део система који су у индустријској примени. Досадашња испитивања у овим системима ослањала су се углавном на експериментима и готово искључиво на експерименталним резултатима. То значи да се врло мало аутора бавило теоријском анализом преноса и објашњавањем механизма који стоје у основама тих преноса. Овај рад полази од анализе граничних слојева који се формира при струјању флуида у партикулативно флуидизованом слоју и као резултат даје дебљину дифузионог и термичког граничног слоја. На основу дебљине граничних слојева дефинише коефицијенте преноса масе и топлоте, а на основу њих и критеријуме и факторе преноса, где су све те величине неопходне код пројектовања процеса. Великим бројем експерименталних мерења који су урађени у овом раду потврђена је валидност теоријски постављених једначина. Верификација модела урађена је у пакованим и транспортним системима чиме је проширена могућност њене примене.

На основу добијених коефицијената преноса постављена је аналогија преноса количине кретања, масе и топлоте у флуидизованом слоју. Наиме, већ постојећа аналогија у флуидизованом слоју постављена у нормализованом облику између количине кретања и масе проширена је на аналогију између количине кретања, масе и топлоте. Највећи допринос овог рада је да су на основу претходно постављених једначина решен проблем одређивања фактора преноса масе и топлоте при минималној флуидизацији и одношењу честица, а да за то није било потребно урадити претходна експериментална мерења. Осим фундаменталног доприноса, успостављена аналогија преноса има и практичан значај који се огледа у томе да се један пренос може употребити као модел за дефинисање друга два што је посебно важно у дисперзним системима где је мерење коефицијената преноса топлоте или масе прилично компликовано.

Посебан део испитивања у овом раду односио се на испитивања преноса масе у флуидизованим слојевима са хемијском реакцијом. Ова испитивања и њихов резултат дат као фактор увећања преноса услед присутне реакције и у облику аналогија преноса имају велики практични значај првенствено у пројектовању хемијских реактора са флуидизованим слојем.

4.3. Верификација научних доприноса

Кандидат Дарко Јаћимовски је публикувао три рада из докторске дисертације и то: два рада у врхунском међународном часопису (M21) и један рад у међународном часопису (M23), чиме је верификовао научни допринос своје докторске тезе.

M21 Рад у врхунском међународном часопису

1. Jaćimovski Darko, Garić-Grulović Radmila, Grbavčić Željko, Bošković Vragolović Nevenka, **Analogy between momentum and heat transfer in liquid–solid fluidized beds**, Powder Technology, **Short communications**, 274 (2015), pp. 213–216, ISSN: 0032-5910, IF: 2.759 (2015), Engineering, Chemical: 26/135 <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.11.010>
2. Jaćimovski, D., Garić-Grulović, R., Vučetić, N., Pjanović, R., & Bošković-Vragolović, N. **Mass transfer and concentration boundary layer in a particulate fluidized bed**. Powder Technology, 303 (2016), pp. 68-75. ISSN: 0032-5910, IF: 2.942 (2016), Engineering, Chemical: 30/135 <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.09.025>

M23 – Рад у међународном часопису

1. **Jaćimovski R. Darko, Garić-Grulović V. Radmila, Grbavčić B. Željko, Đuriš M. Mihal, Bošković-Vragolović M. Nevenka, Analogija prenosa količine kretanja, toplote i mase pri vertikalnom hidrauličkom transportu inertnih čestica, Hemijska Industrija, 68, 1 (2014) pp. 15-25.**

ISSN: 0367-598X, IF: 0.562 (2013), Engineering, Chemical: 103/133

<http://www.doiserbia.nb.rs/img/doi/0367-598X/2014/0367-598X1300025J.pdf>

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

На основу претходно наведеног, мишљење Комисије је да докторска дисертација кандидата **Дарка Јаћимовског**, дипл. инж. технологије, под називом „**Дисконтинуални гранични слој и аналогije преноса у пакованим, флуидизованим и транспортним системима течност-честице**“ представља оригиналан научни допринос предметне области истраживања. Оригиналноост докторске дисертације кандидата је потврђена објављивањем радова у часописима међународног значаја. Постављени предмет и циљеви докторске дисертације у потпуности су остварени, на основу чега Комисија износи своје мишљење да докторска дисертација под називом „**Дисконтинуалан гранични слој и аналогije преноса у пакованим, флуидизованим и транспортним системима течност-честице**“ у потпуности испуњава све захтеване критеријуме и предлаже Наставно-научном већу Технолошко-металуршког факултета, Универзитета у Београду, да прихвати овај Реферат, пружи на увид јавности поднету докторску дисертацију кандидата **Дарка Јаћимовског**, дипл. инж. технологије у законом предвиђеном року, као и да Реферат упути Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду и да након завршетка процедуре позове кандидата на усмену одбрану дисертације пред Комисијом у истом саставу.

У Београду, 08.09.2017.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

Др Невенка Бошковић-Враголовић, редовни професор
Универзитет у Београду, Технолошко-металуршки факултет

Др Радмила Гарић Груловић, научни саветник
Универзитет у Београду, Институт за хемију, технологију и металургију

Др Рада Пјановић, ванредни професор
Универзитет у Београду, Технолошко-металуршки факултет