

## 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 аналогije 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 аналогije 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 аналогije 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 аналогije 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 многостаклава 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