

## **ВЕЋУ ДОКТОРСКИХ СТУДИЈА**

**Предмет:** Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата  
**Милана М. Раковића, маг. инж. маш.**

Одлуком Наставно-научног већа Машинског факултета Универзитета у Београду број 351/2 од 09.03.2023. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Милана М. Раковића, маг. инж. маш., под насловом

### **„Утицај смицања на коефицијент отпора мехура при двофазном мехурастом струјању“**

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**

Кандидат Милан Раковић је школске 2016/2017. године уписао прву годину докторских студија на Универзитету у Београду - Машински факултет. Све испите предвиђене планом докторских студија положио је са просечном оценом 10,00 (десет). Кандидат је 10.11.2022. године поднео захтев број 1780/1 да му се одобри израда докторске дисертације на Машинском факултету Универзитета у Београду. За ментора је предложен др Александар Тоћић, ванредни професор Универзитета у Београду - Машински факултет. На основу сагласности Катедре за механику флуида број 1780/2 од 30.11.2022. године, Наставно-научно веће Машинског факултета Универзитета у Београду је 15.12.2022. године донело Одлуку број 1780/3 о именовању Комисије за подношење реферата о подобности кандидата Милана Раковића, маг. инж. маш. студента докторских студија на Машинском факултету у Београду и научне заснованости теме докторске дисертације под називом „Утицај смицања на коефицијент отпора мехура при двофазном мехурастом струјању“, у следећем саставу:

- др Милан Лечић, редовни професор, Универзитет у Београду - Машински факултет,
- др Владимир Стевановић, редовни професор, Универзитет у Београду - Машински факултет,

- др Снежана Милићев, ванредни професор, Универзитет у Београду - Машински факултет,
- др Новица Јанковић, доцент, Универзитет у Београду - Машински факултет,
- др Душан Продановић, редовни професор, Универзитет у Београду - Грађевински факултет.

Наведена комисија је поднела Извештај број 1780/4, од 28.12.2022. На основу поднетог извештаја, Наставно-научно веће Машинског факултета у Београду 19.01.2023. године доноси Одлуку број 1780/5 да се прихвата научна заснованост теме докторске дисертације, констатује да кандидат испуњава све услове за израду дисертације, и да се за ментора именује др Александар Ђоћић, ванредни професор Машинског факултета. Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду 13.02.2023. године доноси Одлуку број 61206-392/2-23 којом се даје сагласност на одлуку Наставно-научног већа Машинског факултета о прихватању теме докторске дисертације Милана Раковића, под називом: „Утицај смицања на коефицијент отпора мехура при двофазном мехурастом струјању“.

На основу обавештења ментора проф. др Александра Ђоћића да је кандидат Милан Раковић завршио докторску дисертацију под насловом: „Утицај смицања на коефицијент отпора мехура при двофазном мехурастом струјању“, колегијум наставника Катедре за механику флуида упућује Наставно-научном већу обавештење о завршетку докторске дисертације и предлог за именовање Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације, број 351/1 од 01.03.2023.

Наставно-научно веће Машинског факултета Универзитета у Београду на седници одржаној 09.03.2023. године доноси одлуку број 351/2 којом се именују чланови Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације у саставу:

- др Милан Лечић, редовни професор, Универзитет у Београду - Машински факултет,
- др Владимир Стевановић, редовни професор, Универзитет у Београду - Машински факултет,
- др Снежана Милићев, ванредни професор, Универзитет у Београду - Машински факултет,
- др Новица Јанковић, доцент, Универзитет у Београду - Машински факултет,
- др Душан Продановић, редовни професор, Универзитет у Београду - Грађевински факултет.

## 1.2 Научна област дисертације

Докторска дисертација кандидата Милана Раковића под насловом „Утицај смицања на коефицијент отпора мехура при двофазном мехурастом струјању“, припада области техничких наука – машинство, ужој научној области Механика флуида, за коју је Машински факултет Универзитета у Београду матичан. У својству ментора, израдом докторске дисертације руководио је др Александар Ђоћић, ванредни професор на Катедри за механику флуида Машинског факултета Универзитета у Београду.

### 1.3 Биографски подаци о кандидату

**Милан (Млађен) Раковић** рођен је 08.04.1992. у Београду. Основну школу „Растко Немањић-Свети Сава“ у Новој Пазови завршио је 2007. године као носилац Вукове дипломе. Средњу школу „Земунска гимназија“ похађао је у периоду од 2007. до 2011. године и све четири године завршио са одличним успехом.

По завршетку средње школе уписује се на Машински факултет Универзитета у Београду 2011. године. Основне академске студије завршава 2014. године са просечном оценом 9,93 (9 и 93/100) и наградом Студент генерације.

Мастер академске студије на модулу Хидроенергетика уписује 2014. године, а завршава их 2016. године са просечном оценом 9,90 (9 и 90/100) и наградом Студент генерације. Мастер (M.Sc.) рад из предмета Нумеричка механика флуида на тему „Нумерички прорачун турбулентног струјања воде кроз цев са уграђеном мерном блендом“ урађен је под менторством проф. др Александра Ђоћића. Рад је одбрањен са оценом 10 (десет).

Након дипломирања, 2016. године, кандидат уписује докторске академске студије на Машинском факултету у Београду при Катедри за механику флуида (број индекса Д05/2016). Као студент докторских студија изводио је аудиторне и лабораторијске вежбе из предмета Механика флуида Б на трећој години основних академских студија у току школске 2016/2017 године. Као добитник стипендије Министарства просвете, науке и технолошког развоја, ангажован је на пројекту под називом „Примена савремених мерних и прорачунских техника за изучавање струјних параметара вентилационих система на моделу енергетски изузетно ефикасног (пасивног) објекта“ чији је евиденциони број ТР35046.

Од 21. децембра 2017. године запослен је на Машинском факултету у звању асистента при Катедри за механику флуида. У наредном периоду настављено је ангажовање кандидата у извођењу аудиторних и лабораторијских вежби на предмету Механика флуида Б. Од 2019. године кандидат је члан тима Лабораторије за механику флуида Машинског факултета у Београду и од тада активно да учествује у њеном раду.

## 2 ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

### 2.1 Садржај дисертације

Докторска дисертација кандидата Милана Раковића, маг. инж. маш., под називом „Утицај смицања на коефицијент отпора мехура при двофазном мехурастом струјању“ је написана на српском језику, ћириличним писмом на 110 страна формата А4. Дисертација садржи: 47 слика, 15 табела, 105 нумерисаних израза и 52 библиографске референце.

Докторска дисертација се састоји од следећих поглавља:

1. Увод
2. Основне једначине вишефазних струјања
3. Турбуленција у вишефазним струјањима
4. Моделирање чланова који описују међусобно дејство фаза
5. Нумерички прорачуни двофазног мехурастом струјања

## 6. Експериментално испитивање двофазног мехурастог струјања

## 7. Закључак

Поред наведеног, докторска дисертација садржи: насловну страну на српском и енглеском језику, страну са подацима о ментору и члановима Комисије, резиме докторске дисертације на српском и на енглеском језику, захвалницу, садржај, списак слика, списак табела, списак коришћених ознака, литературу, прилоге, кратку биографију аутора, Изјаву о ауторству, Изјаву о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада и Изјаву о коришћењу.

## 2.2 Кратак приказ појединачних поглавља

У првом поглављу је приказан теоријски увод у област вишефазног струјања, која је предмет истраживања у овој докторској дисертацији. Посебна пажња је посвећена двофазном мехурастом струјању које образују течна и гасовита фаза. У оквиру прегледа литературе приказани су важни досадашњи резултати истраживања у овој области. Дефинисани су задаци које је потребно остварити у оквиру докторске дисертације. На крају првог поглавља је представљена структура докторске дисертације.

У другом поглављу су представљене основне једначине вишефазних струјања, које произилазе из основних закона: закона одржања масе, закона о промени количине кретања и закона одржања енергије. Сprovedено је запреминско осредњавање основних једначина.

Треће поглавље је посвећено решавању проблема турбуленције у области вишефазних струјања. Временски се осредњавају једначине које су већ осредњене по запремини, при томе се користе поступци Рејнолдсовог и Фавреовог осредњавања. Приказани су поступци моделирања турбуленције, тј. моделирања оних чланова у основним једначинама који у себи садрже осредњене вредности производа флукуација. Објашњена је разлика турбулентних модела са и без зидних функција и приказан је турбулентни модел  $k - \epsilon$  Launder Sharma који је коришћен у каснијим прорачунима. Дат је кратак преглед и других приступа решавању проблема турбуленције. Основне једначине су сведене на општи, заједнички облик који је погодан за решавање нумеричким поступком.

У оквиру основних једначина вишефазних струјања јављају се чланови који описују међусобно дејство фаза тј. описују размену масе, количине кретања и енергије између фаза. Размена се одвија преко разделне површи. Ови чланови су од великог значаја. Овим члановима је посвећено четврто поглавље, у којем је приказано и њихово математичко моделирање. За ову докторску дисертацију од највећег значаја је сила отпора мехура при двофазном мехурастом струјању. Приказане су једначине за рачунање коефицијента отпора. Дата је постојећа корекција коефицијента отпора која узима у обзир утицај смицања. Наведено је шта су ограничења постојеће корекције. Анализом експерименталних резултата предложена је нова корекција коефицијента отпора која, за разлику од постојеће, треба да буде компатибилна са турбулентним моделима без зидних функција.

Пето поглавље је посвећено нумеричким прорачунима двофазног мехурастог струјања у вертикалним цевима кружног попречног пресека. Извршене су две групе нумеричких прорачуна: са коришћењем нове корекције коефицијента отпора и без ње. Приказани су резултати и једне и друге групе прорачуна. Они су међусобно поређени, а истовремено је

извршено поређење и са доступним експерименталним подацима. Изведени су основни закључци о утицају нове корекције коефицијента отпора.

Тема шестог поглавља је експериментално испитивање двофазног мехурастог струјања у каналу правоугаоног попречног пресека. Приказано је постројење које је пројектовано и израђено у ту сврху. Објашњен је принцип рада најважнијих делова постројења и представљени су мерни уређаји. Мерење је извршено у укупно 30 мерних тачака које су смештене на осама симетрије правоугаоног канала. Испитано је 24 режима двофазног мехурастог струјања. Приказан је поступак обраде резултата који се односе на брзину и кинетичку енергију турбуленције течне фазе. Добијени резултати су представљени у виду дијаграма.

Последње, седмо поглавље представља закључак. Сажето је изложен преглед урађеног у оквиру докторске дисертације. Таксативно је извршена оцена испуњености задатих циљева докторске дисертације који су наведени у првом поглављу. Дат је план будућих истраживања која се надовезују на приказану докторску дисертацију.

## **3 ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ**

### **3.1 Савременост и оригиналност**

Област вишефазног струјања је актуелна и изазовна област у којој постоји значајан број нерешених питања. Међу њима је проблем моделирања чланова који описују интеракцију фаза. Једним од тих чланова, силом отпора мехура при двофазном мехурастом струјању, се бави ова докторска дисертација. За испитивање утицаја корекције коефицијента отпора на резултате прорачуна коришћене су савремене истраживачке методе прорачунске механике флуида. Нумерички прорачуни струјања су спроведени применом CFD (енг. Computational Fluid Dynamics) софтвера отвореног кода OpenFOAM. Овај софтвер је често коришћен у научној заједници. Његова главна предност је у томе што је то софтвер отвореног кода, тако да истраживачи имају приступ изворном коду који се може мењати и прилагођавати конкретним потребама. У случају ове докторске дисертације та могућност је искоришћена за имплементацију нове корекције коефицијента отпора. Анализом резултата овако извршених нумеричких прорачуна дошло се до оригиналних закључака о утицају корекције коефицијента отпора.

При извођењу експеримента у оквиру ове докторске дисертације коришћена је савремена мерна техника LDA (енг. Laser Doppler Anemometry). На тај начин су одређени профили брзине и кинетичке енергије турбуленције течне фазе дуж оса канала правоугаоног попречног пресека.

### **3.2 Осврт на референтну и коришћену литературу**

У списку литературе се налазе 52 референце. Ту су наведени научни радови и књиге референтне за област двофазног мехурастог струјања. Кандидат је у оквиру дисертације представио преглед истражене литературе и истакао најважније закључке који из ње следе. Наведеном литературом обухваћене су различите методе истраживања двофазног мехурастог струјања. Направљен је преглед доступних база експерименталних резултата. Приказани су математички модели који се користе у нумеричким прорачунима за моделирање двофазног

мехурастог струјања. Детаљније су обрађене оне референце на које се наслања циљ истраживања ове докторске дисертације.

### **3.3 Опис и адекватност примењених научних метода**

За извођење основних једначина вишефазног струјања коришћен је модел два флуида, а за решавање проблема турбуленције Рејнолдсов статистички приступ. Да би основне једначине вишефазних струјања биле решене нумеричким поступком њих је најпре потребно дискретизовати. Метода коначних запремина се користи да се од диференцијалних једначина добију дискретизоване алгебарске једначине. Развијено је више алгоритама за итеративно нумеричко решавање система дискретизованих основних једначина. У оквиру предметне докторске дисертације коришћен је PIMPLE алгоритам. Нумерички прорачуни су извршени коришћењем софтвера OpenFOAM. Прорачунска динамика флуида (CFD) представља једну од најчешће коришћених савремених метода за истраживање у области механике флуида. Добијени резултати нумеричких прорачуна су верификовани поређењем са доступним експерименталним резултатима.

### **3.4 Применљивост остварених резултата**

Спровођење експерименталних испитивања у области вишефазних струјања може захтевати значајна материјална средства и много времена. Као бржа и јефтинија замена често се користе нумерички прорачуни. Од почетка њиховог коришћења тежи се усавршавању математичких модела. Тако се дошло до увођења корекције коефицијента отпора која узима у обзир утицај смицања. Мана постојеће корекције је та што се она може користити само са турбулентним моделима са зидним функцијама (енг. High Reynolds Number Turbulence Models - HRN). Резултат предметне докторске дисертације је нова корекција коефицијента отпора која се може користити и са турбулентним моделима без зидних функција (енг. Low Reynolds Number Turbulence Models - LRN). Сада је могуће да се прорачун струјања изврши и у непосредној близини зида и да се при томе узме у обзир утицај смицања на коефицијент отпора мехура.

### **3.5 Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад**

Чланови Комисије сматрају да је кандидат кроз рад на докторској дисертацији показао да поседује способност спровођења научно-истраживачког рада, под чиме се подразумева способност да препозна, дефинише и реши научне и инжењерске проблеме. Способност је показана кроз: извршени преглед литературе у вези са предметом истраживања, дефинисања циљева рада, спровођења обимног нумеричког испитивања у које је укључен нови математички модел, затим кроз спровођење експерименталног испитивања и кроз детаљну анализу добијених резултата и извођење закључака.

## 4 ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

### 4.1 Приказ остварених научних доприноса

Оригинални научни допринос кандидата Милана Раковића у оквиру докторске дисертације под називом „Утицај смицања на коефицијент отпора мехура при двофазном мехурастом струјању“ је нови модел корекције коефицијента отпора која узима у обзир утицај смицања, приказан је у потпоглављу 4.3 дисертације, на странама 61-64 дисертације, и објављен је у раду „Euler-Euler numerical simulations of upward turbulent bubbly flows in vertical pipes with low-Reynolds-number model“, у часопису *Advances in Mechanical Engineering* категорије M23 и доступан је на е-адреси <https://doi.org/10.1177/16878132221094909>. На наведеном раду кандидат је први аутор и једини докторант.

### 4.2 Критичка анализа резултата истраживања

Досадашња корекција коефицијента отпора се може користити само са турбулентним моделима са зидним функцијама (HRN). Покушај да се она искористи заједно са турбулентним моделима без зидних функција (LRN) доводи до нестабилности и прекида нумеричких прорачуна. Оригинални научни допринос докторске дисертације представља нова корекција коефицијента отпора која се може успешно користити и са турбулентним моделима без зидних функција (LRN). Ово омогућава да се спроведу нумерички прорачуни струјања и у непосредној близини зида и да се при томе урачуна утицај смицања на коефицијент отпора мехура. Ово је важно јер управо у овој области смицање има највећи утицај на коефицијент отпора. Такође, применом LRN турбулентних модела избегава се коришћење зидних функција. То је позитивно јер је и даље отворено питање да ли је у прорачунима вишефазног струјања оправдано користити зидне функције које су примарно моделиране за једнофазно струјање флуида.

У докторској дисертацији је приказана и анализа која на основу вредности степена смицања указује на то колики је очекивани утицај смицања на резултате прорачуна у конкретном случају.

### 4.3 Верификација научних доприноса

У следећим научним радовима су верификовани научни доприноси предметне докторске дисертације:

#### Категорија M23:

- [1] **Raković M**, Radenković D., Ćočić A., Lečić M., *Euler-Euler numerical simulations of upward turbulent bubbly flows in vertical pipes with low-Reynolds-number model*. *Advances in Mechanical Engineering*, 2022, 14(4), ISSN: 1687-8140, IF: 1.566 (M23).  
<https://doi.org/10.1177/16878132221094909>

#### Категорија M34:

- [2] **Raković M.**, Radenković D., Ćočić A. and Lečić M.: *Influence of the drag coefficient of a single bubble in vertical upward turbulent bubbly flows*, ICAS 2022 Book of abstracts, 25.05.2022.-28.05.2022., ISBN: 978-99938-39-99-6, page 85.

## 5 ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

На основу прегледа и детаљне анализе докторске дисертације кандидата **Милана М. Раковића**, маг. инж. маш., под насловом „**Утицај смицања на коефицијент отпора мехура при двофазном мехурастом струјању**“, Комисија за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације констатује да урађена докторска дисертација представља оригиналан научни допринос у проучавању утицаја смицања на коефицијент отпора мехура при двофазном мехурастом струјању, да је дисертација написана према свим стандардима научно-истраживачког рада, као и да испуњава све услове предвиђене Законом о високом образовању и да је у складу са Статутом и Правилником о докторским студијама Машинског факултета Универзитета у Београду. Комисија констатује да је кандидат Милан Раковић, маг. инж. маш., успешно завршио докторску дисертацију у складу са предвиђеним предметом и задатим циљевима истраживања.

Комисија предлаже Наставно-научном већу Машинског факултета у Београду да се докторска дисертација под насловом „**Утицај смицања на коефицијент отпора мехура при двофазном мехурастом струјању**“ кандидата **Милана М. Раковића**, маг. инж. маш., заједно са овим Извештајем, прихвати, изложи на увид јавности и упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

Београд, 19. април 2023. год.

### ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

---

**др Милан Лечић**, редовни професор,  
Универзитет у Београду - Машински факултет

---

**др Владимир Стевановић**, редовни професор,  
Универзитет у Београду - Машински факултет

---

**др Снежана Милићев**, ванредни професор,  
Универзитет у Београду - Машински факултет

---

**др Новица Јанковић**, доцент,  
Универзитет у Београду - Машински факултет

---

**др Душан Продановић**, редовни професор,  
Универзитет у Београду - Грађевински факултет