

Факултет Машински

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

Веће научних области техничких наука
(Назив стручног већа коме се захтев упућује, сагласно

члану 6. и чл. 7 став 1. овог правилника)

496/6

(Број захтева)
09.05.2019. године

(Датум)

ЗАХТЕВ**за давање сагласности на реферат о урађеној докторској дисертацији**

Молимо да, сходно члану 46. ст. 5 тач. 4. Статута Универзитета у Београду („Гласник Универзитета“, број 131/06), дате сагласност на реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата:

ДАРКО (РАДОМИР) РАДЕНКОВИЋ

(име, име једног од родитеља и презиме)

КАНДИДАТ **ДАРКО (РАДОМИР) РАДЕНКОВИЋ** уписан на Докторске студије 2010. год.

(име, име једног од родитеља и презиме)

Поднео је захтев за израду докторске дисертације:

УТИЦАЈ ХРАПАВОСТИ ЗИДОВА КАНАЛА ПРИ СТРУЈАЊУ МЕШАВИНЕ ГАСА И ЧЕСТИЦА У УНУТРАШЊИМ ТУРБУЛЕНТНИМ СТРУЈАЊИМА

Универзитет је дана 25.12.2017. год. својим актом под бр. 61206-5089/2-17 дао сагласност на предлог теме докторске дисертације која је гласила:

УТИЦАЈ ХРАПАВОСТИ ЗИДОВА КАНАЛА ПРИ СТРУЈАЊУ МЕШАВИНЕ ГАСА И ЧЕСТИЦА У УНУТРАШЊИМ ТУРБУЛЕНТНИМ СТРУЈАЊИМАКомисија за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата: **ДАРКО (РАДОМИР) РАДЕНКОВИЋ**

(име, име једног од родитеља и презиме)

Образована је на седници одржаној 11.04.2019. године, одлуком факултета под бр. 496/4, у саставу:

Име и презиме члана комисије	звање	научна област	установа у којој је запослен
1. <u>Др Милан Лечић</u>	Ред. проф.	Механика флуида	Машински факултет Београд
2. <u>Др Никола Младеновић</u>	Ред. проф.	Механика	Машински факултет Београд
3. <u>Др Невена Стевановић</u>	Ред. проф.	Механика флуида	Машински факултет Београд
4. <u>Др Александар Ћоћић</u>	Ванр. проф.	Механика флуида	Машински факултет Београд
5. <u>Др Горан Живковић</u>	Виши научни сарадник	Енергетика, енергетска ефикасност и обновљиви извори енергије	Институт Винча Београд

Наставно-научно веће факултета прихватило је извештај Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације на седници одржаној дана 09.05.2019. године.

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

проф.др Радивоје Митровић

Прилог: 1. Извештај комисије са предлогом.
2. Акт Наставно-научног већа факултета о усвајању извештаја.
3. Примедбе дате у току стављања извештаја на увид јавности, уколико је таквих примедби било.

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ –
Број: 496/6
Датум: 09.05.2019. године
Београд, Краљице Марије 16

На основу члана 30. Закона о високом образовању („Службени гласник РС“, број 76/2005, 100/2007 – аутентично тумачење, 97/2008, 93/2012 и 89/2013), члана 64. Статута Машинског факултета (број 1450/4 од 14.06.2018. године) и члана 37. Правилника о докторским студијама Машинског факултета и реферата Комисије у саставу: др Милан Лечић, ред. проф., ментор, др Никола Младеновић, ред. проф., др Невена Стевановић, ред. проф., др Александар Ћоћић, ванр. проф. и др Горан Живковић, виши научни сарадник, Институт Винча Београд о оцени докторске дисертације „Утицај храпавости зидова канала при струјању мешавине гаса и честица у унутрашњим турбулентним струјањима“ студента докторских студија **Дарка Раденковића, маг. инж. маш.**, Наставно-научно веће Машинског факултета на седници одржаној 09.05.2019. године, донело је следећу

ОДЛУКУ

Усваја се реферат Комисије о урађеној докторској дисертацији **„УТИЦАЈ ХРАПАВОСТИ ЗИДОВА КАНАЛА ПРИ СТРУЈАЊУ МЕШАВИНЕ ГАСА И ЧЕСТИЦА У УНУТРАШЊИМ ТУРБУЛЕНТНИМ СТРУЈАЊИМА“** студента **ДАРКА РАДЕНКОВИЋА, маг. инж. маш.**

Докторску дисертацију и реферат Комисије о урађеној докторској дисертацији доставити на давање сагласности Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду, по истеку рока од 30 дана у коме су били на увиду јавности.

Одлуку доставити: Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду, студенту, ментору и архиви Факултета.

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

проф. др Радивоје Митровић

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ И ВЕЋУ ДОКТОРСКИХ СТУДИЈА

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата **Дарка Р. Раденковића**,
маст. инж. маш., студента Докторских студија

Одлуком Наставно-научног већа бр. 496/4 од 11. 04. 2019. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Дарка Р. Раденковића под насловом

„Утицај храпавости зидова канала при струјању мешавине гаса и честица у унутрашњим турбулентним струјањима“

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 Дарко Р. Раденковић, маст. инж. маш, уписао је Докторске студије Машинског факултета Универзитета у Београду школске 2010/11. године. Положио је испите из свих предмета предвиђених наставним планом и програмом за ниво докторских студија са просечном оценом 10 (десет).

Кандидату је одобрено мировање школске 2015/16. године (решење 9/14928 од 30. 09. 2015. године), продужење статуса студента на Докторским студијама у трајању од два семестра у школској 2017/18. године (решење 2351/1 од 06. 10. 2017. године) и продужење статуса студента на Докторским студијама у трајању од два семестра у школској 2018/19. години (решење 9/14479 од 09. 10. 2019. године).

На основу захтева кандидата бр. 2552/1 од 17. 10. 2017. године, да се прихвати тема и одобри израда докторске дисертације под насловом **„Утицај храпавости зидова канала при струјању мешавине гаса и честица у унутрашњим турбулентним струјањима“**, Наставно – научно веће Машинског факултета Универзитета у Београду доноси Одлуку, бр. 2837/2 од 9. 11. 2017. године, да му се одобри пријава теме докторске дисертације и именује се Комисија за подношење реферата о теми докторске дисертације у саставу: др Цветко Црнојевић, ред. проф, др Милан Лечић, ред. проф, др Невена Стевановић, ред. проф, др Никола Младеновић, ред. проф. и др Горан Живковић, виши научни сарадник запослен на Институту за нуклеарне науке „Винча“. На основу Извештаја Комисије за оцену подобности теме и кандидата за израду докторске дисертације бр. 2837/3 од 29. 11. 2017. године,

Наставно – научно веће Машинског факултета Универзитета у Београду прихватило је научну заснованост теме докторске дисертације Одлуком 2837/4 од 30. 11. 2017. године и за ментора је именован проф. др Цветко Црнојевић. Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду је Одлуком бр. 61206-5089/2-17 од 25. 12. 2017. године, дало сагласност на предлог теме докторске дисертације.

Ментор проф. др Цветко Црнојевић је средином јануара 2019. године кандидату рекао да је рад на дисертацији завршен и тражио му да одштампану радну верзију преда њему и неким члановима Комисије. На жалост, професор др Цветко Црнојевић је преминуо 6. марта не дочекавши одбрану ове дисертације коју је успешно водио.

На предлог Катедре за механику флуида, Наставно – научно веће, Одлуком 496/2 од 14. 03. 2019. године, за новог ментора ове дисертације бира проф. др Милана Лечића.

Ментор проф. др Милан Лечић је 05. 04. 2019. године обавестио Катедру за механику флуида да је докторска дисертација завршена. С тим у вези, Катедра за механику флуида је Дописом бр. 496/3 од 05. 04. 2019. године обавестила Наставно – научно веће Машинског факултета Универзитета у Београду о завршетку израде докторске дисертације Дарка Раденковића и предложена је Комисија за преглед, оцену и одбрану предметне докторске дисертације. На основу тог дописа, Наставно – научно веће је 11. 04. 2019. донело Одлуку 496/4 о формирању Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације у следећем саставу:

- 1) др Милан Лечић, редовни професор, ментор
- 2) др Невена Стевановић, редовни професор,
- 3) др Александар Ђоћић, ванредни професор,
- 4) др Никола Младеновић, редовни професор,
- 5) др Горан Живковић, виши научни сарадник, Институт за нуклеарне науке „Винча“

1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација кандидата Дарка Р. Раденковића припада области техничких наука – Машинство, ужа научна област Механика флуида, за коју је матичан Машински факултет Универзитета у Београду. Ментор др Милан Лечић је редовни професор на Катедри за механику флуида Машинског факултета Универзитета у Београду. Као аутор или коаутор до сада је публикувао 12 радова на SCI листи.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Дарко Р. Раденковић је рођен 06.12.1986. год. у Београду, општина Савски венац, Србија. Машински факултет Универзитета у Београду је уписао школске 2005/06 године. Основне академске студије завршио је са просечном оценом 9,79 (девет и 79/100). Мастер академске студије, модул Термоенергетика, завршио је са просечном оценом 10 (десет). За време студија био је стипендиста Министарства просвете као и Фонда за младе таленте.

Докторске студије на Машинском факултету Универзитета у Београду уписао је школске 2010/11. године. Током студија имао је једну годину мировања и две године продужења студирања.

На Машинском факултету Универзитета у Београду радио је као асистент на Катедри за механику флуида у два изборна периода, од 24. 12. 2010. год. до 24. 12. 2016. год. У настави, држао је аудиторне вежбе из следећих предмета: Механика флуида Б, Механика флуида М, Динамика гасова, Транспорт флуида цевима и Класична и уљна хидраулика.

Тренутно је запослен као самостални стручни сарадник у Лабораторији за механику флуида.

Познаје програмске језике и пакете: FORTRAN, C++, MatLab, LaTeX, AutoCad, Microsoft Office и SolidWorks.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација је документ формата А4, штампан једнострано, написан на српском језику, ћириличним писмом. Дисертација је написана на укупно 151 нумерисане стране укључујући и Референце (укупно 69 референци на 6 страна), илустрована је са 57 слика и дијаграма, 210 нумерисаних израза и 2 табеле. Дисертација је изложена у оквиру 10 поглавља:

- 1) Увод
- 2) Преглед литературе
- 3) Основне карактеристике дисперзних струјања
- 4) Основне једначине при дисперзном струјању
- 5) Принципи LES симулације и моделирање утицаја вртлога малих размера
- 6) Метод коначних запремина
- 7) Стохастичко моделирање 3Д одбијања честице од изотропног храпавог зида
- 8) Стохастичко моделирање 3Д одбијања честице од анизотропног храпавог зида
- 9) LES струјања чистог флуида и LES-DPS мешавине гаса и честица у хоризонталном каналу правоугаоног попречног пресека
- 10) Закључак и правац будућих истраживања

На почетку рада је дат Списак ознака, као и продужени резиме на српском и енглеском језику, док су на крају дати биографски подаци кандидата.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У *првом (уводном) поглављу* објашњава се предмет проучавања дисертације – судар честице и храпавих зидова, при струјању мешавине гаса и честица у простору ограниченом храпавим зидовима и наводе се примери у којима су ови судари могу остварити значајан ефекат на особине обе фазе. Дефинишу се начини симулације судара честице са храпавим зидом и даје се кратак приказ дисертације по поглављима.

У *другом поглављу* приказан је преглед литературе која је релевантна за предметно истраживање. Референце новијег датума указују на актуелност истраживања дисперзних струјања ограничених храпавим зидовима.

У *трећем поглављу*, у циљу описа дисперзних струјања, дефинишу се појмови запреминског удела фаза, степена пуњења дисперзне фазе, времена одзива честица као и Стоксов број. У зависности од запреминске концентрације честица, приказана је подела режима дисперзних струјања на разблажени и густ режим. У погледу спреге честица и флуида при проучавању дисперзних струјања, разликују се једнострука спрега (флуид утиче на кретање честица), двострука спрега (флуид утиче на кретање честица, али и честице утичу на струјање флуида) и четворострука спрега (флуид утиче на кретање честица, честице утичу на струјање флуида али међусобни утицај честица путем њихових судара није занемарљив).

У четвртом поглављу је дат опис прорачунских метода дисперзних струјања Ојлер-Лагранж и Ојлер-Ојлер. Дефинишу се и следеће методе осредњавања физичких величина при дисперзном струјању: временско осредњавање, осредњавање по ансамблу, запреминско и фазно осредњавање. Приказани су запремински осредњени облици основних једначина континуалне фазе (једначине континуитета, једначине количине кретања и једначине одржања енергије). Детаљно су описани Лагранжов и Ојлеров приступ проучавања дисперзне фазе. У оквиру Лагранжовог приступа, извршена је анализа сила које делују на честицу при њеном кретању у флуиду.

У петом поглављу обрађене су теоријске поставке симулације великих вртлога (LES) у случају струјања нестишљивог флуида. Како би се затворио одговарајући систем једначина, описани су следећи модели утицаја вртлога малих размера: модел Смагоринског, динамички једно-једначински модел и WALE модел. Ови модели су коришћени при симулацијама у поглављу 9.

У шестом поглављу представљена је дискретизација методом коначних запремина. Под овом дискретизацијом обухваћена је дискретизација домена и дискретизација једначина. При дискретизацији домена, струјни простор се дели на коначан број ћелија и даје се опис могућих типова мрежа. При дискретизацији транспортне једначине, објашњава се принцип дискретизације сваког члана појединачно. Такође, дефинишу се услови које физичке величине морају да испуне на границама прорачунског домена. Коначно, описана је дискретизација филтрираних Навије-Стоксових једначина као и PISO алгоритама за прорачун брзине и притиска при нестационарним струјањима.

Стохастичко моделирање 3Д одбијања честице од изотропног храпавог зида описано је у седмом поглављу. Виртуелни изотропни/анизотропни зид ствара се у функцији од RMS висине неравнина и корелационих дужинских размера. Потом се дефинишу углови вектора нормале изотропног виртуелног зида и врши се статистичка анализа ових углова, а потом и моделирање одговарајућег угла у случају мале храпавости површине. Наводи се поступак нумеричких симулација 3Д судара честице и храпавог зида и врши се статистичка анализа резултата добијених симулација. У равни одбијања честице од храпавог зида, добијено је добро слагање угла одбијања честица израчунатих из детерминистичких симулација са резултатима примењеног 2Д стохастичког модела. Налази се да трансверзална девијација угла одбијања честица расте са порастом угла који честица гради са идеалном глатком површином. Извршено је статистичко моделирање вектора нормале изотропног виртуелног зида које честице виде при великим долазним угловима, као и поређење са резултатима нумеричке симулације. Егзактно су дефинисани бочни ефекти одбијања честице од зида у случају великих долазних углова честица. Потом, извршено је статистичко моделирање углова вектора нормале изотропног храпавог зида при било ком долазном углу честице. Детерминистичке симулације судара честице са храпавим зидом показују да механизам вишеструких судара остаје непромењен у односу на 2Д модел. Коначно, дефинише се стохастичка процедура за одбијање честице од изотропног храпавог зида у Лагранжовом окружењу и врши се поређење резултата нове стохастичке процедуре са расположивим експерименталним подацима и резултатима 2Д модела.

У осмом поглављу разматра се судар честице са анизотропним храпавим зидом. Најпре се врши анализа углова вектора нормале у случају анизотропног зида и дефинише се веза параметара анизотропне површине и стандардне девијације вектора нормале те површине. Вектор нормале виртуелног зида се дефинише и у заротираном координатном систему. Потом, извршава се статистичка анализа резултата детерминистичких судара честице и анизотропног зида. За нападне углове честица дуж дефинисаних оса у хоризонталној равни, за одређивање углова одбијања честица могуће је користити 2Д модел. Међутим, за све друге нападне углове честица, потребно је дефинисати нови модел. Извршено је статистичко моделирање углова вектора нормале у заротираном координатном систему, при произвољном углу ротације координатног система и налази се да ови углови имају 2Д

Гаусову расподелу. Извршено је моделирање углова вектора нормале при великим долазним угловима, а потом и при малим долазним угловима честица. Механизам вишеструких судара честица са зидом и даље остаје непромењен у односу на 2Д модел. Дефинише се одговарајућа стохастичка процедура за судар честице са анизотропним зидом и врши се валидација те процедуре поређењем са расположивим експерименталним подацима и резултатима детерминистичке симулације. Израчунавају се и стандардне девијације попречне компоненте брзине честице генерисане при судару честице и зида, за различите пречнике честица и различите храпавости/материјале зида канала.

У *деветом поглављу* детаљно је описан поступак LES симулације струјања чистог флуида (без дисперзне фазе) у хоризонталном каналу правоугаоног попречног пресека. Добијени резултати (профили просечне брзине и профили RMS флуктуација) дуж висине зида канала се слажу веома добро са расположивим експерименталним подацима као и резултатима расположивих DNS симулација. Израчунате корелације брзине указују на правилно изабрану величину домена у којој је извршена LES симулација. Потом, детаљно је описан поступак LES-DPS симулације струјања мешавине гаса и честица у хоризонталном каналу и излаже се модел меких сфера. Анализом резултата LES-DPS симулација, закључује се да 3Д модели за судар честице и храпавог зида, при струјању мешавине гаса и честица у хоризонталном каналу, највећи значај имају при малим концентрацијама честица у каналу.

У *десетом поглављу* дају се закључна разматрања резултата предметне докторске дисертације и наводе се могућности за наставак истраживања.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Докторска дисертација под називом „**Утицај храпавости зидова канала при струјању мешавине гаса и честица у унутрашњим турбулентним струјањима**“ кандидата Дарка Р. Раденковића представља савремен и оригиналан допринос при проучавању дисперзних струјања ограничених храпавим зидом. Модели који су развијени у оквиру дисертације за 3Д судар честице и храпавог зида представљају природни наставак одговарајућих 2Д модела тих судара. С обзиром на геометрију храпавог зида и долазне углове честица, судар честице и храпавог зида је увек 3Д, па примена нових стохастичких процедура омогућава тачнији прорачун читаве класе дисперзних струјања ограничених храпавим зидом. Ова струјања су предмет великог броја савремених истраживања, с обзиром на велику заступљеност у инжењерској пракси.

При нумеричким прорачунима LES-DPS турбулентног струјања мешавине гаса и честица у хоризонталном каналу, коришћен је софтвер отвореног кода OpenFOAM. Да би се извршили неопходни прорачуни, Кандидат је у овај софтвер отвореног кода имплементирао модел меких сфера који омогућава бржи прорачун разблажених дисперзних струјања, у односу на постојећи модел меких сфера у OpenFOAM, који је прилагођен густим струјањима. Такође, кандидат је у овај пакет имплементирао и стохастичке процедуре за 3Д судар честице и зида, развијене у оквиру дисертације. Захтевни нумерички прорачуни LES-DPS турбулентног струјања мешавине гаса и честица у хоризонталном каналу су урађени на суперкомпјутеру CALMIP у Тулузу, у Француској.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Прегледом цитиране литературе, извојене у поглављу Литература, закључује се да је кандидат Дарко Раденковић при изради доктората користио литературу која је референтна и актуелна. У циљу систематизације резултата постојећих истраживања из области која је предмет дисертације, кандидат је навео све значајне референце које за тему имају судар

честице и храпавог зида при струјањима мешавине честица и гаса. Наведене су и референце из области турбулентног струјања флуида, нумеричке механике флуида као и референце из области вишефазних струјања.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

При изради предметне дисертације вршене су детерминистичке симулације удара честице у изотропни или анизотропни виртуелни храпав зид. Статистичком анализом добијених резултата долази се до важних закључака, који омогућавају даље статистичко моделирање процеса. Коначно, дефинишу се стохастичке процедуре које омогућавају 3Д прорачун судара честице и храпавог зида. Ове процедуре су применљиве при свим дисперзним струјањима ограниченим храпавим зидом у којима се користи Лагранжовом приступ при проучавању кретању честица.

При LES прорачунима турбулентног струјања у хоризонталном каналу, као и при LES-DPS прорачунима турбулентног струјања мешавине гаса и честица, коришћен је софтвер отвореног кода OpenFOAM. У овај софтвер, кандидат је имплементирао модел меких сфера, као и сопствене 3Д процедуре за судар честице и храпавог зида. Симулацијама су добијене детаљне информације о струјном пољу при струјању флуида, као и о утицају судара честица и зидова на статистичке особине струјања честица.

3.4. Применљивост остварених резултата

Струјање мешавине гаса и честица је важно у многим процесима у процесној и фармацеутској индустрији као нпр. при пнеуматском транспорту, флуидизацији, аеродинамичкој класификацији прахова и сепарацији у циклонским сепараторима. Таква вишефазна турбулентна струјања ограничена зидом су комплексна и много спрегнутих механизма утиче на особине фаза које чине поменуто струјање.

Када се узме пример пнеуматског транспорта, с обзиром да је количина прашкастог материјала која се транспортује сваке године изузетно велика, како би ови процеси транспорта били што економичнији, тачан прорачун особина обе фазе је од изузетне важности. При нумеричким симулацијама са постојећим моделима за судар честице и зида, модели за судар честице и зида су углавном 2Д. Међутим, због долазних углова честица као и због геометрије храпаве површине, судар честице и храпавог зида је увек 3Д. Из тог разлога, развијене стохастичке процедуре омогућавају тачнији прорачун дисперзних струјања, при Ојлер-Лагранж методи прорачуна. На тај начин, обезбеђује се ефикасније коришћење енергије али омогућава се и ефикасније пројектовање система и уређаја у којима струји мешавина гаса и честица, у простору ограниченом храпавим зидовима.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Чланови Комисије сматрају да је кандидат Дарко Раденковић кроз рад на предметној дисертацији показао да може успешно да решава научне проблеме у области вишефазних струјања примењујући савремене научно-истраживачке методе. Кандидат је, уз велику меру самосталности, извршио велики број прорачуна и анализу одговарајућих резултата.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

У оквиру рада на дисертацији „Утицај храпавости зидова канала при струјању мешавине гаса и честица у унутрашњим турбулентним струјањима“ кандидат Дарко Р. Раденковић је потврдио и проширио постојећа знања при турбулентном струјању мешавине гаса и честица у простору ограниченом чврстим храпавим зидовима. Услед тога, ова докторска дисертација представља научни допринос у области механике флуида.

Научни доприноси предметне дисертације су:

- Формиран је концепт 3Д храпавог изотропног/анизотропног виртуелног зида. Уместо интеракције сферне честице и стварне храпаве површине, анализира се еквивалентан судар центра честице са виртуелним храпавим зидом. На овај начин постиже се значајно упрошћење ове интеракције. 3Д детерминистичке симулације судара честице и храпавог зида, формиране у току израде овог доктората, омогућавају детаљну анализу трајекторије честице након њеног одбијања од храпавог зида. Статистичком анализом ових резултата, добијају се значајни закључци о угловима одбијања честице. Статистички је моделиран судар честице и изотропног зида при великим и малим долазним угловима честица и дефинисана је одговарајућа стохастичка процедура за те сударе, у Лагранжовом окружењу. Ови резултати су публиковани у радовима [1] и [2] (одељак 4.3 Верификација научних доприноса).
- Извршене су LES симулације турбулентног струјања чистог флуида у хоризонталном каналу мале висине, коришћењем различитих модела вртлога малих размера. Такође, извршене су и LES-DPS симулације турбулентног струјања мешавине гаса и честица. Извршена је анализа резултата за различите случајеве струјања: за различите пречнике честица, различите храпавости зидова и различите степене пуњења дисперзне фазе. У програмски пакет OpenFOAM је имплементиран модел меких сфера прилагођен разблаженим струјањима. Стохастичке процедуре за судар честице и храпавог зида, које су формиране у оквиру овог доктората, су имплементирани у програмски пакет OpenFOAM. Резултати ових истраживања ће бити објављени у раду [3] (одељак 4.3 Верификација научних доприноса).

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Постојећи модели за судар честице и храпавог зида су 2Д или упрошћени 3Д без могућности подешавања степена анизотропности храпаве површине зида. Међутим, услед геометрије храпавог зида као и због долазних углова честица, судар честица и храпавог зида је увек 3Д. Из тог разлога, у овом докторату, формиране су стохастичке процедуре 3Д судар честице и изотропног/анизотропног храпавог зида. Изведене процедуре представљају природни наставак постојећих 2Д процедура.

Стохастичке процедуре су изведене у Лагранжовом окружењу и могу имати широку примену при проучавању дисперзних струјања ограничених храпавим зидовима (при пнеуматском транспорту, при флуидизацији), у различитим струјним геометријама.

У оквиру доктората, за LES симулације турбулентног струјања флуида као и при LES – DPS симулацијама турбулентног струјања мешавине гаса и честица, коришћен је софтвер

отвореног кода OpenFOAM. Кандидат је у овај софтвер имплементирао изведене стохастичке моделе за судар честице и храпавог зида као и модел меких сфера описан у предметној дисертацији. Модел меких сфера, који је доступан у програмском коду OpenFOAM, прилагођен је за густа, контактна струјања. Како се у дисертацији проучавају разблажена струјања мешавине гаса и честица у хоризонталном каналу мале висине, примена таквог модела меких сфера резултовала би великим временом прорачуна. Да би се то избегло, тј. како би се скратило укупно време прорачуна, у OpenFOAM је имплементиран модел меких сфера прилагођен разблаженим струјањима.

Анализом резултата LES – DPS симулација, закључује се да судар честица и зида највећи утицај остварује при малим концентрацијама честица. Са повећањем запреминске концентрације честица, међусобни судари честица постају доминантан ефекат у погледу попречне флукуације брзине.

4.3. Верификација научних доприноса

Доприноси предметне докторске дисертације су верификовани кроз следеће радове:

Категорија M21:

- [1] **Radenkovic, D.**, Simonin, O.: Stochastic modeling of three-dimensional particle rebound from isotropic rough wall surface, *-International Journal of Multiphase Flows*, vol. 109, pp. 35-50, 2018 (IF=2.592) (ISSN: 0301 - 932).

Категорија M34:

- [2] **Radenkovic, D.**, Simonin, O., Crnojevic, C.: “Transverse particle dispersion induced by three dimensional rebound from isotropic or anisotropic rough wall,” -5th International Conference on Turbulence and Interaction, Fort-de-France, Martinique, 2018.
- [3] **Radenkovic, D.**, Fede, P., Simonin, O., Crnojevic, C.: “Large Eddy Simulation of particle laden turbulent channel flows with isotropic and anisotropic wall roughness,” -10th International Conference of Multiphase Flow, Rio de Janeiro, Brazil, 19-24 May 2019, http://www.icmf2019.com.br/scientific_topics.html (прихваћен абстракт)

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

На основу прегледа и детаљне анализе докторске дисертације под називом „Утицај храпавости зидова канала при струјању мешавине гаса и честица у унутрашњим турбулентним струјањима“, кандидата Дарка Р. Раденковића, маг. инж. маш, Комисија за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације констатује да урађена дисертација представља оригиналан научни допринос у проучавању дисперзних струјања ограничених храпавим зидовима, да је дисертација написана према свим стандардима научно-истраживачког рада и да испуњава све услове предвиђене Законом о високом образовању, стандардима и Статутом Машинског факултета Универзитета у Београду.

Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације предлаже Наставно-научном већу Машинског факултета у Београду да прихвати овај Извештај, да дисертацију **„Утицај храпавости зидова канала при струјању мешавине гаса и честица у унутрашњим турбулентним струјањима“** кандидата Дарка Р. Раденковића, маг. инж. маш, заједно са овим Извештајем стави на увид јавности у складу са законским одредбама, и да потом целокупни материјал упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универитета у Београду.

У Београду, 23. 04. 2019. године

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

Др Милан Лечић, редовни професор, ментор
Универзитет у Београду, Машински факулте

.....

Др Никола Младеновић, редовни професор
Универзитет у Београду, Машински факултет

.....

Др Невена Стевановић, редовни професор
Универзитет у Београду, Машински факултет

.....

Др Александар Ћоћић, ванредни професор
Универзитет у Београду, Машински факултет

.....

Др Горан Живковић,
Виши научни сарадник, Институт Винча

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ –
Број: 496/6
Датум: 09.05.2019. године
Београд, Краљице Марије бр. 16

На основу члана 40. Закона о високом образовању („Службени гласник РС“, број 88/2017 и 27/2018-др. закон), члана 48. Правилника о докторским студијама, члана 64. Статута Машинског факултета (број 1450/4 од 14.06.2018. године) и члана 37. Правилника о докторским студијама Машинског факултета, Наставно-научно веће на седници одржаној 09.05.2019. године, донело је

ОДЛУКУ

Усваја се реферат Комисије о урађеној докторској дисертацији **„УТИЦАЈ ХРАПАВОСТИ ЗИДОВА КАНАЛА ПРИ СТРУЈАЊУ МЕШАВИНЕ ГАСА И ЧЕСТИЦА У УНУТРАШЊИМ ТУРБУЛЕНТНИМ СТРУЈАЊИМА“** студента **ДАРКА РАДЕНКОВИЋА**, маг. инж. маш.

Јавна одбрана докторске дисертације обавиће се по добијању сагласности Универзитета у Београду.

Универзитет у Београду је својом Одлуком број 61206-5089/2-17, од 25.12.2017. године, дао сагласност на предлог теме докторске дисертације.

Објављени радови студента у часописима међународног значаја:

Категорија M21:

- [1] **Radenkovic, D.**, Simonin, O.: Stochastic modeling of three-dimensional particle rebound from isotropic rough wall surface, -*International Journal of Multiphase Flows*, vol. 109, pp. 35-50, 2018 (**IF=2.592**) (ISSN: 0301 - 932).

Одлуку доставити: студенту, ментору, Катедри за механику флуида и архиви Факултета.

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

проф. др Радивоје Митровић