

ВЕЋУ ДОКТОРСКИХ СТУДИЈА

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата Милана М. Петровића,
маст. инж. маш., студента докторских студија

Одлуком Наставно-научног већа Машинског факултета Универзитета у Београду бр. 866/2 од 20.05.2021. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата **Милана М. Петровића, мастер инжењера машинства**, под насловом

„Динамика испаравања у великим запреминама течности изложеним великим специфичним топлотним протоцима у генераторима паре“

Након 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 М. Петровић**, студент докторских студија, уписао је прву годину докторских студија на Машинском факултету Универзитета у Београду школске 2012/13. године. Током студија положио је све испите предвиђене планом и програмом докторских академских студија.

Кандидат Милан М. Петровић маст. инж. маш. поднео је захтев за одобрење теме докторске дисертације број 1800/1 од 23.09.2015. године на Машинском факултету Универзитета у Београду. Кандидат је за ментора предложио др Владимира Стевановића, редовног професора Машинског факултета Универзитета у Београду. Наставно-научно веће Машинског факултета Универзитета у Београду донело је одлуку бр. 1456/2 од 23.06.2016. године о прихватању теме докторске дисертације под називом „Динамика испаравања у великим запреминама течности изложеним великим специфичним топлотним протоцима у генераторима паре“ и именован је ментор проф. др Владимир Стевановић. Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду дало је сагласност на предлог теме докторске дисертације Милана М. Петровића, маст. инж. маш. одлуком број 61206-3989/2-16 од 19.09.2016. године.

На основу обавештења проф. др Владимира Стевановића да је кандидат Милан М. Петровић завршио докторску дисертацију под насловом „Динамика испаравања у великим запреминама течности изложеним великим специфичним топлотним протоцима у генераторима паре“ и предлога Катедре за термоенергетику, Наставно-научно веће Машинског факултета Универзитета у Београду донело је одлуку број 866/2 од 20.05.2021. године о именовању Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације у саставу:

- др Владимир Стевановић, ментор, редовни професор Машинског факултета Универзитета у Београду,
- др Милош Бањац, редовни професор Машинског факултета Универзитета у Београду,
- др Сања Миливојевић, ванредни професор Машинског факултета Универзитета у Београду,
- др Милада Пезо, виши научни сарадник, Институт за нуклеарне науке „Винча“,
- др Милица Илић, научни сарадник, Иновациони центар Машинског факултета Универзитета у Београду.

1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација Милана М. Петровића, под насловом „Динамика испаравања у великим запреминама течности изложеним великим специфичним топлотним протоцима у генераторима паре“ припада области техничких наука - машинство, ужа научна област термоенергетика, за коју је матичан Машински факултет Универзитета у Београду.

Ментор др Владимир Стевановић је редовни професор на Машинском факултету Универзитета у Београду. Као аутор или коаутор до сада је публикувао 37 радова у часописима на SCI листи.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Милан М. Петровић, мастер инжењер машинства је рођен 10.05.1988. године у Горњем Милановцу, Република Србија. Основну школу и „Гимназију 1300 каплара“ је завршио у Љигу. Машински факултет Универзитета у Београду је уписао 2007. године. Основне академске студије је завршио 2010. године са просечном оценом 8,57. Мастер академске студије је завршио 2012. године на Катедри за термоенергетику, са просечном оценом на 9,15. Докторске студије је уписао 16.11.2012. године на Машинском факултету Универзитета у Београду. Положио је све испите предвиђене програмом Докторских академских студија са просечном оценом 10,0. На основу одлуке Наставно-научног већа Машинског факултета број 1456/2 од 23.06.2016. године, прихваћена је тема докторске дисертације „Динамика испаравања у великим запреминама течности изложеним великим специфичним топлотним протоцима у генераторима паре“ и именован је ментор проф. др Владимир Стевановић.

Учествовао је у изради пројекта Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије ОИ 174014 под називом „Напредне аналитичке, нумеричке и методе анализе примењене механике флуида и комплексних система“ у периоду од 2013. до 2019. год. У периоду од 2020. до данас је учесник на пројекту који спроводи Машински факултет Универзитета у Београду „Интегрисана истраживања у области макро, микро и нано машинског инжењерства“, а који финансира Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије.

Кандидат активно користи енглески језик и има основно знање француског језика. Поседује опште знање рада на рачунару (Windows, Fortran, Pascal, MatLab, Microsoft Office, AutoCAD, SolidWorks).

Милан М. Петровић је као аутор или коаутор објавио 11 радова у часописима на SCI листи. Ови радови су цитирани 38 пута без самоцитата и Хиршов индекс је 4 према бази Scopus.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација Милана М. Петровића, под називом „Динамика испаравања у великим запреминама течности изложеним великим специфичним топлотним протоцима у генераторима паре“ садржи: 112 страна формата А4, 49 слика, 10 табела и списак коришћене литературе који садржи 149 референци.

Дисертација садржи следећа поглавља:

1. Увод
2. Преглед досадашњих истраживања кључања у великим запреминама течности
3. Моделирање генерисања паре у условима базенског кључања
4. Моделирање генерисања паре у условима кључања на спољашњој површини цевног снопа генератора паре
5. Закључак

Поред наведеног, дисертација садржи резиме на српском и енглеском језику, списак ознака, списак слика, списак табела, као и 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 уводном поглављу 1 је изложен задатак који се решава у оквиру докторске дисертације, изложена је феноменологија процеса испаравања у великој запремини течности у дијабатским условима на загрејаним површинама и у адијабатским условима при смањењу притиска у загрејаној течности, указано је на значај предвиђања наведених процеса са становишта пројектовања енергетски ефикасних и термички сигурних генератора паре и дат је преглед појединих поглавља докторске дисертације.

У поглављу 2 је дат преглед досадашњих истраживања кључања у великим запреминама течности. Описани су карактеристични механизми кључања и представљена је динамика процеса у виду такозване „криве кључања“. Изложени су механизми хомогене и хетерогене нуклеације и динамика раста парног мехура. Дат је преглед експериментаних корелација које су развијене за предвиђање појединих феномена кључања, као што су густина нуклеације на површини грејаног зида, пречник мехура при одвајању са загрејане површине, фреквенција генерисања мехура, као и корелације за одређивање специфичног топлотног протока у зависности од прегрејања зида у односу на температуру сатурације течности и друге утицајне параметре процеса. Приказани су до сада остварени резултати у истраживању кључања применом модела вишефазних струјања и метода нумеричке механике флуида. Посебно се истиче приказ механизма кључања и примењених метода истраживања у зависности од карактеристичних димензија разматраних појава, као што су макро модели кључања, микро и мезо симулације кључања и истраживања појаве на нано нивоу.

У поглављу 3 кандидат је приказао резултате сопствених истраживања кључања у великој запремини течности, такозвано базенско кључање. Изложио је математички модел базенског кључања, примењене конститутивне корелације које одређују механизме размене масе, количине кретања и енергије на разделним површинама фаза, примењену SIMPLE („Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations“) методу за нумеричко решавање билансних једначина двофазног струјања и провођења топлоте у грејаном зиду, сопствени компјутерски програм за спровођење нумеричких симулација и остварене резултате нумеричке симулације базенског кључања. Извршена је детаљна анализа осетљивости развијеног модела на поједине механизме и утицајне параметре базенског кључања и

валидација резултата у односу на резултате експерименталних истраживања који су расположиви у литератури.

У поглављу 4 кандидат је приказао резултате остварене у изучавању генерације паре на спољашњој површини цеви у снопу генератора паре. Кандидат је развио модел двофазног струјања са генерацијом паре на секундарној страни вертикалног генератора паре у нуклеарној електрани са вреловоденим реактором. Применио је SIMPLE методу за нумеричко решавање билансних једначина двофазног струјања. Развио је сопствени компјутерски програм за прорачун двофазног струјања у генератору паре. Резултате нумеричке симулација двофазног струјања на секундарној страни генератора паре је валидирао поређењем са расположивим измереним вредностима.

У поглављу 5 кандидат је истакао научни значај резултата остварених у докторској дисертацији, указао је на њихову примењивост у инжењерској пракси и могуће правце даљег истраживања.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Спроведено истраживање кључања у великој запремини течности је савремено с обзиром на то да се данас при развоју и пројектовању генератора паре постављају сложени захтеви за генерисање паре на грејаним површина које су изложене великим специфичним топлотним протоцима, који су блиски критичним топлотним флуксевима при којима долази до кризе размене топлоте. Криза размене топлоте је праћена термомеханичким оштећењем материјала грејаног зида или засушењем и губитком топлотног понора на страни пријемника топлоте. Истраживања у овој области су савремена и због даљег истраживања сложених механизма генерисања паре и двофазног струјања на грејаним површинама, а које је омогућено применом савремених метода нумеричке механике флуида и унапређених модела вишефазног струјања. Савременост истраживања се огледа и у већем броју радова који се објављују у водећим међународним часописима на тему нумеричких симулација и анализа мехурастог кључања и двофазног струјања, како са становишта изучавања фундаменталних процеса, тако и у циљу предвиђања и анализе рада генератора паре и спровођења сигурносних анализа.

Кандидат је у истраживању користио оригинални приступ који је заснован на моделу и нумеричком методу који у оквиру примењене нумеричке мреже разликује различите механизме размене топлоте на грејаном зиду, као што су дискретна места раста мехура и спрегнуто провођење топлоте са зида на слој течности на преосталој површини. За разлику од примењеног новог метода, досадашњи приступ симулацији размене топлоте при кључању помоћу двофлуидних модела подразумева да су сви механизми размене топлоте истовремено присутни на загрејаној површини. Такође, спроведене нумеричке симулације и анализе дају оригиналне резултате који показују који механизми и параметри процеса имају битни утицај на динамику кључања у великим запреминама течности.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Списак литературе која је коришћена у дисертацији је дат као посебна целина, где су литерални наводи дати према абецедном реду, а у тексту се наводе презименом првог аутора и годином публикавања. Прегледом цитиране литературе, може се закључити да је кандидат при изради дисертације користио актуелну и референтну литературу.

На основу цитиране литературе кандидат је приказао тренутно стање у области истраживања кључања у великим запреминама течности, указао је на нерешене проблеме и поставио је циљеве истраживања у оквиру дисертације. Кандидат је коректно проучио и цитирао наведене изворе.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Генерисање паре при базенском кључању је математички описано тродимензионалним моделом два флуида, тако што су билансне једначине масе, количине кретања и енергије формиране за сваку од фаза у двофазном току. Транспортни процеси на разделним површинама фаза су одређени применом одговарајућих конститутивних корелација. Добијени систем парцијалних диференцијалних једначина се нумерички решава применом методе коначних запремина и SIMPLE алгоритма. Спроведене су нумеричке симулације и анализе генерације паре у великим запреминама течности за различита топлотна оптерећења, термо-физичке карактеристике и геометрије грејаних површина. Добијени резултати су валидирани поређењем са расположивим експерименталним резултатима доступним у литератури.

Генерисање паре у струјним условима при кључању на спољашњој површини цевног снопа у генератору паре је математички описано моделом два флуида за порозну средину, при чему је порозност одређена присуством цеви кроз које струји флуид предајник топлоте и које формирају цевни сноп. Билансне једначине модела формирају систем парцијалних диференцијалних једначина, који је решен нумерички, такође методом контролних запремина и SIMPLE алгоритмом. Пренос топлоте са примарног флуида на секундарни у генератору паре је моделиран у карактеристичним областима размене топлоте: конвективног преноса топлоте једнофазном флуиду у топлој и хладној грани и области преноса топлоте кључањем. Спроведене су нумеричке симулације струјања на секундарној страни генератора паре за две експерименталне инсталације са секундарним флуидом водом и фреоном. Добијени су резултати у виду поља енталпије течности, поља запреминског удела паре, брзинских поља течне и парне фазе и поља притиска, који су валидирани поређењем са одговарајућим доступним експерименталним резултатима.

3.4. Применљивост остварених резултата

Развијени математички модел и поступак нумеричке симулације базенског кључања омогућавају поуздано предвиђање криве кључања, односно зависности специфичног топлотног протока од прегрејања грејане површине у односу на температуру сатурације, при чему се обухвата утицај свих значајних параметара на динамику одвијања процеса, као што је густина нуклеације мехурова, угао квашења на зиду, термо-физичке карактеристике материјала грејаног зида и течности и др. Развијени метод је примењив у даљим истраживањима утицаја механизма кључања на динамику генерације паре, хлађења грејаних зидова, појаве кризе размене топлоте и двофазног струјања у генераторима паре. Са становишта инжењерске праксе развијени метод омогућава поуздано предвиђање коефицијента прелаза топлоте при мехурастом кључању у великој запремини течности, услова природне циркулације у великој запремини течности у генераторима паре, просторне расподеле запреминског удела паре и поуздано предвиђање критичног топлотног флукса. Развијени математички модел струјања са кључањем на спољашњој површини цевног снопа генератора паре и одговарајући поступак нумеричког решавања, представља поуздан приступ при предвиђању температуре секундарног флуида, поља запреминског удела паре, брзинских поља течне и парне фазе и поља притиска. Оба развијена модела су од посебног значаја за пројектовање и анализе сигурности нуклеарних и других енергетских и индустријских генератора паре и испаривача.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Чланови Комисије сматрају да је кандидат Милан М. Петровић током израде докторске дисертације показао стручност, знање и способност да самостално препозна и

систематски решава инжењерске и научне проблеме, да користи расположиву литературу и примењује савремене методе истраживања. Остварени резултати докторске дисертације показују способност кандидата за самостални научно-истраживачки рад.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

Кандидат је развио нови модел и нумерички поступак за симулацију кључања на површини грејаног зида, који обухватају раст мехурова на дискретним местима нуклеације и провођење топлоте са зида на слој течности на преосталој површини. Применом развијеног метода је спровео јединствене нумеричке симулације чији резултати показују и квантификују динамику одвијања базенског кључања у зависности од утицајних параметара процеса, као што је: (а) повећање прегрејања зида при константном специфичном топлотном протоку услед смањења густине нуклеације, смањења угла квашења и смањења топлотне проводности материјала зида, (б) локално смањење температуре зида на месту раста мехура, (в) смањење температуре у грејаном зиду при примени запреминске генерација топлоте у односу на грејање зида на спољашњој површини, (г) смањење прегрејања зида са повећањем масе течности у посуди до одређеног нивоа, (д) зависност дистрибуције паре и нивоа двофазне мешавине од специфичног топлотног протока. Наведени резултати су приказани у поглављу 3, при чему је допринос кандидата развоју модела кључања приказан од 39 до 40 стране, на страни 46 и од 59 до 61 стране, а допринос у истраживању процеса базенског кључања је приказан од стране 47 до 59. Наведени научни доприноси кандидата су објављени у раду:

M.M. Petrović, V.D. Stevanovic, Coupled two-fluid flow and wall heat conduction modelling of nucleate boiling, Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, који је доступан на <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10407782.2021.1935047?src=&journalCode=unht20>

Кандидат је спровео валидацију конститутивних корелација за брзину испаравања и кондензације, које су приказане у поглављу 3 на страни 40, за услове термичке неравнотеже на разделним површинама течне и парне фазе. Ови резултати су објављени у раду:

V.D. Stevanovic, **M.M. Petrovic**, S. Milivojevic, B. Maslovaric, Prediction and control of steam accumulation, Heat Transfer Engineering, Vol. 36, Issue 5, 2015, pp. 498-510, доступно на адреси <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01457632.2014.935226>

Кандидат је учествовао у спровођењу нумеричких експеримената који показују механизам настанка парне фазе при великим топлотним флуксевима на нано нивоу применом неравнотежних молекуларно динамичких симулација, што је приказано у поглављу 2 на странама 34 и 35 и публиковано је у раду:

M. Ilic, V.D. Stevanovic, S. Milivojevic, **M.M. Petrovic**, New insights into physics of explosive water boiling derived from molecular dynamics simulations, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 172, 2021, Article number 121141, доступно на адреси <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0017931021002441?via%3Dihub>

Кандидат је учествовао у изради оригиналног критичког прегледа публикованих резултата о кључању у великој запремини течности, који је заснован на сагледавању и могућем повезивању резултата остварених на различитим карактеристичним размерама одвијања процеса, од макро нивоу у струји двофазне мешавине, преко микро и мезо нивоа на површини за размену топлоте са различитим механизмима генерације паре, до молекуларног нивоа одвијања фазног прелаза. Овај преглед резултата публикованих у литератури је приказан у поглављу 2 дисертације на странама од 24 до 37 и публикован је у раду:

M. Ilic, **M.M. Petrovic**, V.D. Stevanovic, Boiling heat transfer modelling: A review and future Prospectus, Thermal Science, Vol. 23, 2019, pp. 87-107, доступно на адреси

<http://thermalscience.vinca.rs/pdfs/papers-2018/TSCI180725249I.pdf>

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Истраживање у оквиру приказане докторске дисертације кандидата Милана М. Петровића обухвата сложене процесе двофазног струјања са испаравањем, који су истраживани применом савремених научних метода нумеричке механике флуида и моделирањем вишефазних струјања. По свеобухватности разматраног проблема и сложености примењених истраживачких метода, остварени резултати су јединствени и представљају значајан научни допринос. Међутим, с обзиром на сложеност како проблема који се решава, тако и примењених метода, сагледавају се могућности даљег рада у овој области. Са становишта развоја модела двофазног струјања са кључањем, даљи правац истраживања може обухватити спрегу и симултано решавање модела макроскопских процеса двофазног струјања, микроскопских модела раста мехура на грејаном зиду и иницијалне нуклеације мехура на нивоу нано димензија у контакту грејаног зида и течности. У случају моделирања двофазног струјања око цеви у снопу, примењени приступ струјања кроз порозну средину се може унапредити моделирањем струјања кроз слободан струјни простор око цеви уз коришћење паралелног рачунања на рачунским машинама већег капацитета. Утицај турбуленције у двофазном току је узет у обзир посредно преко коефицијената трења на зиду и кроз запреминске силе међуфазног трења, тако да даљи рад може бити усмерен ка увођењу модела турбуленције двофазног струјања у до сада развијени модел двофазног струјања.

4.3. Верификација научних доприноса

Резултати остварени у оквиру докторске дисертације кандидата Милана М. Петровића су објављени у радовима:

1. **M.M. Petrović**, V.D. Stevanovic, Coupled two-fluid flow and wall heat conduction modelling of nucleate boiling, Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, DOI: 10.1080/10407782.2021.1935047; ISSN: 1521-0634, (категорија часописа **M21**).
2. M. Ilic, V.D. Stevanovic, S. Milivojevic, **M.M. Petrovic**, New insights into physics of explosive water boiling derived from molecular dynamics simulations, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 172, 2021, Article number 121141, DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121141, ISSN: 0017-9310, (категорија часописа **M21a**).
3. M. Ilic, **M.M. Petrovic**, V.D. Stevanovic, Boiling heat transfer modelling: A review and future Prospectus, Thermal Science, Vol. 23, 2019, pp. 87-107, DOI: 10.2298/TSCI180725249I, ISSN: 0354-9836, (категорија часописа **M23**).
4. A.D. Stojanovic, V.D. Stevanovic, **M.M. Petrovic**, D. Zivkovic, Numerical investigation of nucleate pool boiling heat transfer, Thermal Science, Vol. 20, 2016, pp. S1301-S1312, DOI: 10.2298/TSCI160404276S; ISSN: 0354-9836, (категорија часописа **M23**).
5. V.D. Stevanovic, **M.M. Petrovic**, S. Milivojevic, B. Maslovacic, Prediction and control of steam accumulation, Heat Transfer Engineering, Vol. 36, Issue 5, 2015, pp. 498-510, DOI: 10.1080/01457632.2014.935226; ISSN: 0145-7632, (категорија часописа **M22**).

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

На основу детаљног прегледа докторске дисертације, Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације констатује да је докторска дисертација под називом **”Динамика испаравања у великим запреминама течности изложеним великим специфичним топлотним протоцима у генераторима паре”** кандидата **Милана М. Петровића**, магистар инжењерских наука, урађена према свим стандардима у научно-истраживачком раду, 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. На основу резултата и закључака приказаних у докторској дисертацији, Комисија констатује да је кандидат Милан М. Петровић, магистар инжењерских наука, успешно завршио докторску дисертацију у складу са предвиђеним предметом и постављеним циљевима истраживања и да докторска дисертација представља оригинални научни рад са научним доприносима у научној области Машинско инжењерство, ужа научна област Термоенергетика. Кандидат је дошао до оригиналних научних резултата који су успешно верификовани и који се могу применити у инжењерској пракси.

Имајући у виду све наведено, Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације предлаже Наставно-научном већу да се докторска дисертација под називом **”Динамика испаравања у великим запреминама течности изложеним великим специфичним топлотним протоцима у генераторима паре”** кандидата **Милана М. Петровића**, студента Докторских студија, прихвати, изложи на увид јавности и упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

У Београду, 23.06.2021. год

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

.....
др Владимир Стевановић, ред. проф., ментор
Универзитет у Београду, Машински факултет

.....
др Милош Бањац, ред. проф.
Универзитет у Београду, Машински факултет

.....
др Сања Миливојевић, ванр. проф.
Универзитет у Београду, Машински факултет

.....
др Милада Пезо, виши научни сарадник
Универзитет у Београду, Институт за нуклеарне науке „Винча“

.....
др Милица Илић, научни сарадник
Универзитет у Београду, Иновациони центар Машинског факултета