

Факултет Машински

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

610/6

(Број захтева)

Веће научних области техничких наука(Назив већа научне области коме се захтев
упућује)13.06.2024.

(Датум)

ЗАХТЕВ**за давање сагласности на одлуку о прихватању теме докторске дисертације и о
одређивању ментора**

Молимо да, сходно члану 47. ст. 5. тач. 3. Статута Универзитета у Београду ("Гласник Универзитета", број 186/15-пречишћени текст и 189/16), дате сагласност на одлуку о прихватању теме докторске дисертације:

**Напредно интегрално и нумеричко моделирање високотемпературских операција и апарата у
процесном инжењерству**

(пун назив предложене теме докторске дисертације)

НАУЧНА ОБЛАСТ

Процесна техника

ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ:

1. Име, име једног од родитеља и презиме кандидата:
МИЛИЦА (МИЛОШ) ИВАНОВИЋ
2. Претходно образовање (назив и седиште факултета, студијски програм):
Машински факултет Београд
3. Година завршетка претходног нивоа студија: 2020.
4. Година уписа на докторске студије: 2021.
5. Назив студијског програма докторских студија: Машинско инжењерство

ПОДАЦИ О МЕНТОРУ:

Име и презиме ментора:

Србислав Генић

Звање:

редовни професор

Списак радова који квалификују ментора за вођење докторске дисертације:

1. Jaćimović Branislav M., Genić Srbslav, Jacimović Nikola (2020). Application of modified Kalina cycle in biomass chp plants, *International Journal of Energy Research*, 44(11), 8754-8768. Wiley, Hoboken, ISSN: 0363-907X, 10.1002/er.5570, M21a.
2. Genić Srbslav, Jaćimović Branislav M., Petrović Andrija (2018). A novel method for combined entropy generation and economic optimization of counter-current and co-current heat exchangers, *Applied Thermal Engineering*, 136, 327-334. Pergamon-Elsevier Science Ltd, Oxford, ISSN: 1359-4311, 10.1016/j.applthermaleng.2018.03.026, M21a.
3. Jacimović Nikola, Genić Srbslav, Jaćimović Branislav M. (2015). Novel method for validation of experimental data for direct contact condensers with zero vapor outflow, *Applied Thermal Engineering*, 91, 1134-1140. Pergamon-Elsevier Science Ltd, Oxford, ISSN: 1359-4311, 10.1016/j.applthermaleng.2015.08.052, M21a.
4. Jaćimović Branislav M., Genić Srbslav, Budimir Nikola, Jarić Marko (2014). Techno-economic optimization of plant for raw ethanol production based on experimental data, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 79, 639-646. Pergamon-Elsevier Science Ltd, Oxford, ISSN: 0017-9310, 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.07.085, M21a.
5. Genić Srbslav, Jaćimović Branislav M., Jarić Marko, Budimir Nikola (2013). Analysis of fouling factor in district heating heat exchangers with parallel helical tube coils, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 57(1), 9-15. Pergamon-Elsevier Science Ltd, Oxford, ISSN: 0017-9310, 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.09.060, M21a.
6. Genić Srbslav, Jaćimović Branislav M., Genić Vojislav (2012). Economic optimization of pipe diameter for complete turbulence, *Energy and Buildings*, 45, 335-338. Elsevier Science Sa, Lausanne, ISSN: 0378-7788, 10.1016/j.enbuild.2011.10.054, M21a.
7. Genić Srbslav, Jaćimović Branislav M., Jarić Marko, Budimir Nikola, Dobrnjac Mirko M. (2012). Research on the shell-side thermal performances of heat exchangers with helical tube coils, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55(15-16), 4295-4300.
8. Pergamon-Elsevier Science Ltd, Oxford, ISSN: 0017-9310, 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.03.074, M21a.
9. Genić Srbslav, Jaćimović Branislav M., Mandić Dragan, Petrović Dragan (2012). Experimental determination of fouling factor on plate heat exchangers in district heating system, *Energy and Buildings*, 50, 204-211. Elsevier Science Sa, Lausanne, ISSN: 0378-7788, 10.1016/j.enbuild.2012.03.039, M21a.
10. Genić Srbslav, Jaćimović Branislav M., Vladić Ljubiša (2008). Heat transfer rate of direct-contact condensation on baffle trays, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51(25-26), 5772-5776. Pergamon-Elsevier Science Ltd, Oxford, ISSN: 0017-9310, 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.05.017, M21a.
11. Genić Srbslav, Jaćimović Branislav M., Janjić Bojan (2007). Experimental research of highly viscous fluid cooling in cross-flow to a tube bundle, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50(7-8), 1288-1294. Pergamon-Elsevier Science Ltd, Oxford, ISSN: 0017-9310, 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.09.004, M21a.
12. Genić Srbslav (2006). Direct-contact condensation heat transfer on downcomerless trays for steam-water system, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49(7-8), 1225-1230. Pergamon-Elsevier Science Ltd, Oxford, ISSN: 0017-9310, 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2005.10.003, M21a.
13. Mihailović Miloš, Milovančević Uroš, Genić Srbslav, Jaćimović Branislav M., Otović Milena, Kolendić Petar (2020). Air side heat transfer coefficient in plate finned tube heat exchangers, *Experimental Heat Transfer*, 33(4), 388-399. Taylor & Francis Inc, Philadelphia, ISSN: 0891-6152, 10.1080/08916152.2019.1656298, M21.
14. Marković Sasa, Jaćimović Branislav M., Genić Srbslav, Mihailović Miloš, Milovančević Uroš, Otović Milena (2019). Air side pressure drop in plate finned tube heat exchangers, *International Journal of Refrigeration-Revue Internationale Du Froid*, 99, 24-36. Elsevier Sci Ltd, Oxford, ISSN: 0140-7007, 10.1016/j.jrefrig.2018.11.038, M21.
15. Radanov Branka B., Genić Srbslav, Jaćimović Branislav M. (2016). Heat Transfer Coefficient for Condensation of Steam on Freely Formed Falling Liquid Jets, *Aiche Journal*, 62(7), 2579-2584. Wiley, Hoboken, ISSN: 0001-1541, 10.1002/aic.15233, M21.
16. Jaćimović Branislav M., Genić Srbslav, Jacimović Nikola B. (2012). Reboiler Separation Efficiencies for Binary Systems, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 51(16), 5793-5804. Amer Chemical Soc, Washington, ISSN: 0888-5885, 10.1021/ie202193m, M21.
17. Jaćimović Branislav M., Genić Srbslav (2011). Normalized Efficiency for Stagewise Operations, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 50(12), 7437-7444. Amer Chemical Soc, Washington, ISSN: 0888-5885, 10.1021/ie2001583, M21.
18. Jaćimović Branislav M., Genić Srbslav, Đorđević Dimitrije R., Budimir Nikola, Jarić Marko (2011). Estimation of the number of trays for natural gas triethylene glycol dehydration column, *Chemical Engineering Research & Design*, 89(6A), 561-572. Elsevier, Amsterdam, ISSN: 0263-8762, 10.1016/j.cherd.2010.08.012, M21.
19. Jaćimović Branislav M., Genić Srbslav, Latinović Boris R. (2006). Research on the air pressure drop in plate finned tube heat exchangers, *International Journal of Refrigeration-Revue Internationale Du Froid*, 29(7), 1138-1143. Elsevier Sci Ltd, Oxford, ISSN: 0140-7007, 10.1016/j.jrefrig.2006.02.003, M21.
20. Milanović P, Jaćimović Branislav M., Genić Srbslav (2004). The influence of heat exchanger performances on the design of indirect geothermal heating system, *Energy and Buildings*, 36(1), 9-14. Elsevier Science Sa, Lausanne, ISSN: 0378-7788, 10.1016/S0378-7788(03)00036-7, M21.
21. Ivošević Miloš, Petrović Andrija, Jaćimović Branislav M., Genić Srbslav (2019). Thermal performances and their impact on design of bayonet-tube heat exchangers - single phase plug flow, *Heat and Mass Transfer*, 55(9), 2391-2407. Springer, New York, ISSN: 0947-7411, 10.1007/s00231-019-02568-3, M22.

ПОДАЦИ О КОМЕНТОРУ:

Име и презиме коментора: Милена Отовић

Звање: ДОЦЕНТ

Списак радова који квалификују ментора за вођење докторске дисертације:

1. Mihailović Miloš, Milovančević Uroš, Genić Srbslav, Jaćimović Branislav M., Otović Milena, Kolendić Petar (2020). Air side heat transfer coefficient in plate finned tube heat exchangers, *Experimental Heat Transfer*, 33(4), 388-399. Taylor & Francis Inc, Philadelphia, ISSN: 0891-6152, 10.1080/08916152.2019.1656298, M21.
2. Marković Sasa, Jaćimović Branislav M., Genić Srbslav, Mihailović Miloš, Milovančević Uroš, Otović Milena (2019). Air side pressure drop in plate finned tube heat exchangers, *International Journal of Refrigeration-Revue Internationale Du Froid*, 99, 24-36. Elsevier Sci Ltd, Oxford, ISSN: 0140-7007, 10.1016/j.ijrefrig.2018.11.038, M21.
3. Milovančević Uroš, Jaćimović Branislav M., Genić Srbslav, El-Sagier Faraj, Otović Milena, Stevanović Snežana M. (2019). Thermoeconomic analysis of spiral heat exchanger with constant wall temperature, *Thermal Science*, 23(1), 401-410. Univerzitet u Beogradu - Institut za nuklearne nauke Vinča, Beograd, ISSN: 0354-9836, 10.2298/TSCI170605150M, M22.
4. Otović Milena, Mihailović Miloš, Genić Srbslav, Jaćimović Branislav M., Milovančević Uroš, Marković Sasa (2018). Reconsideration of data and correlations for plate finned-tube heat exchangers, *Heat and Mass Transfer*, 54(10), 2987-2994. Springer, New York, ISSN: 0947-7411, 10.1007/s00231-018-2328-0, M22.
5. Genić Srbslav, Jaćimović Branislav M., Milovančević Uroš, Ivošević Miloš, Otović Milena, Antić Milan I. (2018). Thermal performances of a "black box" heat exchanger in district heating system, *Heat and Mass Transfer*, 54(3), 867-873. Springer, New York, ISSN: 0947-7411, 10.1007/s00231-017-2182-5, M22.

Обавештавамо вас да је Наставно – научно веће на седници одржаној 13.06.2024. године размотрило предложену тему и закључило да је тема подобна за израду докторске дисертације јер садржи оригиналну идеју и да је од значаја за развој науке, примену њених резултата, односно развој научне мисли уопште.

ДЕКАН ФАКУЛТЕТА

Прилог:

1. Одлука Наставно-научног већа о прихватању теме и одређивању ментора
2. Извештај Комисије о оцени научне заснованости теме докторске дисертације

Напомена: Факултет доставља Универзитету захтев са прилозима у електронској форми и једном писаном примерку за архиву Универзитета

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ -
Број: 510/5
Датум: 13.06.2024. године
Београд, Краљице Марије 16

На основу члана 40. Закона о високом образовању („Службени гласник РС“, број 88/2017, 73/2018, 27/2018 – др. закон 67/2019, 6/2020 – др. закони, 11/2021 – аутентично тумачење, 67/2021, 67/2021– др. закон и 76/2023), члана 64. Статута Машинског факултета – пречишћени текст (број 1136/4 од 28.06.2021. године), Одлуке о изменама и допунама Статута број 239/6 од 17.02.2023. године и члана 38. Правилника о докторским студијама на Универзитету у Београду - Машинском факултету, Наставно-научно веће Машинског факултета на седници од 13.06.2024. године донело је:

О Д Л У К У
о прихватању Извештаја Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације

Прихвата се Извештај Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације кандидата **МИЛИЦЕ ИВАНОВИЋ**, магист. инж. маш. под насловом „Напредно интегрално и нумеричко моделирање високотемпературских операција и апарата у процесном инжењерству“.

Извештај је поднела Комисија у саставу: др Мирјана Стаменић, ванр. проф., др Урош Милованчевић, ванр. проф., др Александар Симоновић, ред. проф., др Јелена Сворцан, ванр. проф. и др Игор Мујан, доцент, Универзитет у Новом Саду – Факултет техничких наука.

За менторе докторске дисертације именује се др Србислав Генић, ред. проф. и др Милена Отовић, доц.

Одлуку доставити: Универзитету у Београду, кандидату, менторима и архиви Факултета.

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

проф. др Владимир Поповић

ВЕЋУ ДОКТОРСКИХ СТУДИЈА

Предмет: Подобност теме и кандидаткиње **Милице Ивановић, маг. инж. маш.** за израду докторске дисертације

Одлуком **510/1** бр. од **10.04.2024.** године, именовани смо за чланове Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације: **„Напредно интегрално и нумеричко моделирање високотемпературских операција и апарата у процесном инжењерству“**, кандидаткиње **Милице Ивановић, маг. инж. маш.**

На основу материјала приложеног уз Захтев кандидаткиње, Комисија подноси следећи

РЕФЕРАТ

1. Подаци о кандидаткињи

1.1. Биографски подаци

Милица М. Ивановић рођена је 2. јула 1995. године у Београду. По завршетку основне школе и Шесте београдске гимназије са одличним успехом Основне академске студије на Универзитету у Београду – Машинском факултету уписује школске 2014/2015. године и завршава их 2017. године са одбрањеним Завршним (B.Sc) радом на тему *„Размењивачи топлоте“* из предмета Термодинамика Б. Од школске 2017/2018. године је похађала Мастер академске студије на Универзитету у Београду – Машинском факултету, на Катедри за термотехнику, које завршава 2020. године са одбрањеним Мастер радом на тему *„Анализа различитих система са угљен-диоксидом као расхладним флуидом“* из предмета Расхладна постројења са оценом 10 (десет).

Кандидаткиња је током студирања мастер студија стекла научно-истраживачка искуства радећи у оквиру заједничког пројекта Министарства рударства и енергетике и Програма Уједињених нација за развој, који је за циљ имао побољшање енергетске ефикасности зграда у јавном сектору кроз увођење информационог система енергетског праћења. Такође, стекла је и практична искуства радећи на изради Идејних пројеката и Пројеката за извођење термотехничких инсталација за објекте јавне намене у Републици Србији у две националне компаније. Од 2020. године учествује у научно-истраживачкој делатности на Машинском факултету у Београду и Иновационом центру Машинског факултета у Београду где сарађује на изради научних радова, извештаја и студија. У оквиру CEEPUS мреже – *Building Knowledge and Experience Exchange in CFD*, била је на студентској размени на Универзитетима у Букурешту, Брашову, Подгорици и Братислави.

Од софтверских пакета кандидаткиња успешно примењује следеће пакете: Microsoft Office, AUTODESK (AUTOCAD 2D, INVENTOR), CATIA, ANSYS, MATLAB, INKSCAPE. Течно говори енглески језик и служи се француском језиком.

1.2. Стечено научно-истраживачко искуство

На Докторским академским студијама Универзитета у Београду – Машинског факултета Милица Ивановић је положила следеће испите: Виши курс математике (оцена 10), Нумеричке методе (оцена 10), ОМНИР и комуникација (оцена 10), Одабрана поглавља из механике флуида (оцена 9), Методе у пројектовању и конструисању опреме за процесну индустрију (оцена 8), Истраживање и публиковање I (оцена 10), Принципи моделирања у процесној техници (оцена 10), Виши курс из процесних феномена (оцена 10), Истраживање и публиковање II (оцена 10), Моделирање и оптимизација расхладних система (оцена 10), Виши курс из дифузионих операција и апарата (оцена 10), Истраживање и публиковање III (оцена 10), Истраживање и публиковање IV (оцена 10). Просечна оцена на Докторским академским студијама кандидаткиње је 9,79 (девет целих 79). Успешно је одбранила и Пројекат идеје докторске дисертације. До сада, остварени број ЕСПБ бодова кандидаткиње је 120.

Све време Докторских студија кандидаткиња Милица Ивановић се успешно бави научно-истраживачким (нумеричким и експерименталним) радом, а показује велики афинитет ка најсавременијим темама из области процесног инжењерства везаним за размењиваче топлоте (топлотне перформансе размењивача топлоте, математичко моделирање транспорта топлоте, нумеричке симулације, оптимизација конструкције и примена нових технологија у производњи размењивача топлоте и сл.). Објављени радови кандидаткиње су следећи:

- Саопштење са међународног скупа штампано у целини – М33

Mališić S., **Ivanović M.**, Bajc T.: *Experimental research on thermal comfort in offices regarding building orientation in winter period*, 13. Međunarodna konferencija –Life Cycle Engineering and Management, Istraživački centar DQM, Prijevor, Jun 2022, ISBN: 978-86-86355-48-5

Baltić, M., **Ivanović, M.**, Tanović, D., Vorkapić, M., Mladenović, I.: *Procedures in Testing the Mechanical Characteristics of Composite Structures and the Possibility of Application to Biodegradable Materials: An Overview*. In: Karakoc, T.H., et al. Novel Techniques in Maintenance, Repair, and Overhaul. ISATECH 2022. Sustainable Aviation. Springer, Cham., 2024, https://doi.org/10.1007/978-3-031-42041-2_31

- Саопштење са међународног скупа штампано у изводу – М34

Ivanović M., Mališić S., Simonović A., Baltić M.: *Perspectives of the integration of an absorption refrigeration cycle in energy production system*, International Conference of Experimental and Numerical Investigations and New Technologies – CNN TECH 2022, Zlatibor 2022, pp. 64, ISBN: 978-86-6060-120-1

Ivanović M., Ivanov T., Kovačević A.: *Numerical investigation of the influence of geometry on the thermal properties of a heat pipe*, 1st International Conference on Mathematical

Modelling in Mechanics and Engineering, Mathematical Institute SANU, 08-10. September, 2022, ISBN 978-86-6060-127

Ivanović M., Baltić M., Tanovic D.: *Towards innovative and more efficient solutions for heat exchangers in aerospace industry*, Conference of Experimental and Numerical Investigations and New Technologies - CNN TECH 2023, Zlatibor 2023, ISBN 978-86-6060-155-3

Ivanović M., Simonović A., Ivanov T., Kovačević A., Tanović D.: *A green building technique: thermal transmittance value of the different materials used in 3D printed houses*, International conference – East Europe conference on AM materials- EECAM21. Faculty of Mechanical Engineering, University of Belgrade 2021, pp. 21, Horizon Europe Twinning project SIRAMM (Project No. 857124)

Ivanović M., Vorkapić A., Simonović A., Ivanov T., Stamenković I.: *Influence of wall layer number around brass inserts in 3D printed specimens subjected to axial pull-out force*, 2nd International Workshop on Structural Integrity of Additively Manufactured Materials-SIAMM22, Brno, Czech Rep. & online, pp. 25, Horizon Europe Twinning project SIRAMM (Project No. 857124)

Tanovic D., Svorcan J., **Ivanovic M.**, Baltic M., Vorkapic M., Telebak K., Stojanovic J.: *The influence of Reynolds number on the airfoils*, International Conference of Experimental and Numerical Investigations and New Technologies - CNN TECH 2022, Zlatibor 2022, pp. 63, ISBN: 978-86-6060-120-1

- Чланак у националном часопису – M53

Ivanović M., Černicin V., Milovančević U., Otović M., Stevanović S.: *Uporedna analiza tri generacije natkritičnih CO₂ sistema*, Časopis KGH, vol. 51, broj 4, 2022, str. 47-50, ISSN 0350-1426, e-ISSN 2560-340X

Ivanov T., **Ivanović M.**, Zubić M., Simonović A.: *Izazovi i prilike vodonika kao vazduhoplovnog goriva budućnosti*, Procesna tehnika, pp. 39, 2023, ISBN 978-86-85535-15-4

1.3. Оцена подобности кандидаткиње за рад на предложеној теми

Комисија сматра да је Милица Ивановић испунила све потребне услове за пријаву теме докторске дисертације и да је способна за самостални рад на предложеној теми. Поред одслушаних предавања, положених испита и одбрањеног Пројекта идеје докторске дисертације, у протеклом периоду кандидаткиња је обављала различита нумеричка и експериментална истраживања, учествовала у реализацији стручних пројеката и публиковала научне радове, што је квалификује за пријаву докторске дисертације „Напредно интегрално и нумеричко моделирање високотемпературских операција и апарата у процесном инжењерству“.

2. Предмет и циљ истраживања

Високотемпературске операције у највећој мери обухватају размену количине топлоте у апаратима у којима се топлота предаје са продуката сагоревања, као и са различитих

продуката егзотермних хемијских реакција. По правилу топлији флуид има температуру вишу од 500°C , а она у извесним случајевима може да премаши 1600°C . Хладнији флуид у овим операцијама може бити течан или гасовит, а у неким случајевима у питању су и растопине соли. Заједничко за све ове операције је да се поред принудне конвекције као механизам размене топлоте јавља и зрачење. Апарати у којима се одвијају наведене операције су у области процесног инжењерства различите врсте индустријских пећи.

У оквиру постројења која укључују високотемпературске операције и апарате одвијају се сложени процеси који укључују физичко-хемијске механизме сагоревања, пратеће турбулентно струјање флуида и сложене механизме транспорта количине топлоте. У експлоатационим условима, рад оваквих апарата може бити стационаран, али и нестационаран, са променама радних параметара сагоревања према захтевима технолошког процеса, па успостављање што тачнијег математичког модела за симулацију рада наилази на примену код великог броја проблема. Са друге стране, примењени принцип моделирања и сам модел треба да пружи адекватну аналогију са стварним системом, те да довољно тачно опишу стварне физичке појаве и понашање целокупног система.

Локална мерења температура током експлоатације која би могла да пружи могућности поређења модела са стварним стањем у високотемпературским уређајима нису једноставна имајући у виду велики опсег температура које се могу остварити у апарату, могућу промену радног режима, тј. варијацију оптерећења, али на крају и због проблема инсталације одговарајућих сензорских система у смислу приступачности. Предвиђањем, проистеклим познавањем и на крају управљањем процесима, који регулишу температуре у ложишту индустријских пећи и котлова, долази се до унапређења њихових перформанси, до веће ефикасности, самим тим мање потрошње енергије, нижих оперативних трошкова и смањења емисије штетних продуката сагоревања. Са друге стране, резултати хемијског анализирања продуката сагоревања представљају свеобухватни показатељ квалитета сагоревања горива и не говоре ништа о локалној расподели температура у ложишту. У досадашњој пракси развијени су одређени модели помоћу којих је могуће одредити локални топлотни флукс дуж озрачене површине цеви у ложиштима [1-4], те ће предмет истраживања ове дисертације, између осталог, бити поставка унапређеног математичког модела, истраживање могућности његове примене на конкретним уређајима, уз статистичку оцену квалитета корелисања и поређење резултата овог модела са постојећим. У оквиру дисертације ће се водити рачуна и о једноставности примене модела за конкретне инжењерске прорачуне. Адекватан математички модел пружа увид у процес размене количине топлоте при промени радних параметара, тако да поређење моделом утврђених топлотних флуксева и расподеле температура са измереним вредностима, за циљ има да обезбеди познавање варијетета оперативних сценарија.

При моделирању високотемпературских операција у ложишту апарата у процесном инжењерству користи се добро познати модел идеалног мешања (назван по ауторима модела *Lobo-Evans* модел) [1]. Овај једнодимензиони модел у основи има апроксимације које претпостављају да је у ложишту постигнута хомогенизација поља температуре, притиска и концентрације флуида по читавој запремини ложишта. Стога, поља су униформна и промена улазног стања флуида тренутно се одражава на стање флуида у посматраној контролној запремини. Једноставност овог модела и његов, до

сада обрађен предиктивни потенцијал (у стручној литератури и у инжењерској пракси), довели су до његове широке употребе у току пројектовања делова високотемпературских апарата [5-6], где се доминантни део укупно предате количине топлоте одвија зрачењем. Оваква поставка модела репрезентује, у одређеној мери, температурски профил продуката сагоревања по висини ложишта, подразумевајући да је њихова температура константна дуж површине цеви и да је једнака температури излазних димних гасова из ложишта. Начела овог модела одражавају се на смањену прецизност одређивања температурског профила зидова цеви, расподелу притиска и процењене перформансе апарата. Такође, постоји лимитираност по питању моделирања динамике протока радних флуида (профила брзина, турбулентних ефеката и рециркулационих зона). За фазу димензионисања и конструисања високотемпературских апарата значајно је да се стварна дистрибуција топлотног флукса одреди са довољном прецизношћу како би се могли гарантовати поузданост опреме и радни век и проценили експлоатациони трошкови. Током експлоатације чести проблеми су везани за рад са смањеним топлотним снагама услед потреба/захтева самог технолошког процеса.

Напреднији једнодимензијски, као и вишедимензијски модели пружају увид у просторну варијацију температурског и концентрационог поља, као и поља притиска, па се може се стећи јаснији увид у квалитет самог процеса сагоревања и фактора неуниформности расподеле топлотног флукса по дужини и радијусу цеви у ложишту [4]. То је код једнодимензијског модела утолико израженије, уколико је дужина ложишта већа у односу на његов (еквивалентни) хидраулички пречник. Познавање топлотног флукса у простору ложишта значајно је када се сагледава и аспект прегревања цеви, задржања цеви и утицај на хладнији процесни флуид, тј. пре свега на карактер двофазног тока унутар појединачних цевних снопова [2,7,8]. Дводимензионални и тродимензионални модели узимају у обзир транспорт топлоте у попречном (радијалном) правцу. У данашњим приступима моделирању афирмишу се симулационе методе које користе напредне софтверске алате рачунарске механике флуида (*computational fluid dynamics* – CFD). Могућност једноставне и брзе промене параметара процеса у нумеричкој симулацији омогућава анализу већег броја топлотних перформанси у релативно кратком времену, те тако може пружити економично, ефикасно и поуздано праћење и прогнозирање рада апарата при промени радних режима.

Услед недостатака стандардизованог модела прорачуна ложишта заснованог на моделу идеалног мешања флуида [7,8] јавља се потреба за другачијим и унапређеним приступом, који ће реалистичније предвидети расподелу температура, топлотног флукса и протоке флуида, као важних инстанци за ефикасност и економичност при раду високотемпературских уређаја. Досадашња научно-стручна литература била је фокусирана на различите методе и приступе овој проблематици, али одређена питања су остала и даље отворена, па је потребно спровести додатни научно-истраживачки рад ради развоја релативно једноставног и уз то довољно поузданог математичког модела.

Постоје три приступа моделирању токова флуида и температурских расподела у високотемпературским процесним апаратима. Први — аналитички, подразумева одређена поједностављења, самим тим смањене је прецизности, што ограничава његову примену и тражи допуну, упркос његовој брзини. Са друге стране, приступ заснован на CFD симулацијама омогућава детаљније истраживање понашања протока и детектовање проблема у читавом домену проучаваног апарата. Недостатак другог приступа је дуготрајно одвијање прорачуна ради добијања прецизних података, што је

израженије са комплексном геометријом и комплексном шемом струјања флуида. У овој дисертацији инициран је компромис између ова два приступа, комбиновањем захтева упрошћених аналитичких модела са квалитетнијим/прецизнијим резултатима добијених CFD симулацијама. Анализа доступне литературе показује да се такав приступ у досадашњим радовима не проналази често [9,10] уз метод који је развијен за одређене компоненте унутар високотемпературских апарата (у првом реду прегрејача паре), те се доводи у питање њихова применљивост за различите врсте високотемпературских процесних апарата.

У овој дисертацији предложена концепција моделирања расподеле топлотног флукса и токова флуида за циљ има да се искористе предности оба приступа моделирању, како би се добила довољно прецизна решења у разумном временском оквиру прорачуна. Потенцијал једнодимензијског модела клипног струјања [2,3] се користи у раду за предвиђање дистрибуције топлотног флукса након одговарајуће модификације његове формулације и употпуњавањем информацијама из експерименталног испитивања и нумеричких симулација. Резултати аналитичког приступа за циљ имају одређивање граничних услова нумеричког експеримента, док резултати нумеричке симулације за циљ имају корекцију иницијално успостављеног математичког модела заснованог на клипном струјању. Оба приступа имају валидациону потпору у експериментално добијеним резултатима индустријског случаја високотемпературског уређаја.

Закључно, предмет истраживања ове докторске дисертације представља поставку, развој и интеграцију процеса интегралног и нумеричког прорачуна, њихову оптимизацију и експерименталну валидацију на примерима одабраних високотемпературских апарата.

Структура циљева истраживања у дисертацији је следећа:

- детаљан преглед постојећих истраживања других аутора из доступне и актуелне литературе и изналажење нивоа усаглашености постојећих процедура за високотемпературске апарате,
- дефинисање универзално важећег модела који ће бити иницијално развијан за реалну високотемпературску операцију односно апарат, заједно са његовом специфичном експлоатационом проблематиком,
- формирање прорачунске процедуре која треба да резултује адекватношћу за различите режиме рада проучаваног процесног система,
- развој процедуралних метода повезивања интегралних и нумеричких прорачуна,
- анализа способности успостављеног модела и доступних модела да дају квалитетне, једнозначно дефинисане и релевантне информације упркос извесним поједностављењима при математичкој формулацији ових модела,
- анализа могућности примене процедуре прорачуна за друге високотемпературске апарате ради димнзионисања или контролних прорачуна,
- анализа различитих радних режима и параметара који утичу на рад оваквих апарата,
- валидација модела и методе поређењем са резултатима експерименталних мерења.

Релевантни библиографски извори:

- [1] Lobo, W. E., and Evans, J. E., 1939, "Heat Transfer in Radiant Section of Petroleum Heaters," Trans. Am. Inst. Chem. Engrs., 35, pp. 748–778

- [2] Hottel, H. C., and Sarofim, A. F., 1965, "The Effect of Gas Flow Patterns on Radiative Transfer in Cylindrical Furnaces," *Int. J. Heat Mass Transfer*, 8(8), pp. 1153–1169 [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(65\)90141-9](https://doi.org/10.1016/0017-9310(65)90141-9)
- [3] B, Jaćimović, S. Genić, N. Jaćimović, Influence of Flue Gas Pattern Flow in Boiler Radiant Section on Heat Transfer, *J. Thermal Sci. Eng. Appl.* Feb 2022, 14(2): 021007, <https://doi.org/10.1115/1.4051369>
- [4] D. Fialová, J. Zdenek, Analysis of Fired Equipment within the Framework of Low-Cost Modelling Systems, *Energies* 2019, 12, 520; <https://doi.org/10.3390/en12030520>
- [5] API, Standard 530. Calculation of Heater-tube Thickness in Petroleum Refineries, 6th ed.; American Petroleum Institute: Washington, DC, USA, 2008
- [6] API, Standard 560. Fired Heaters for General Refinery Service, 4th ed.; American Petroleum Institute: Washington, DC, USA, 2007.
- [7] J. Taler, P. Duda, B. Weglowski, W. Zima, S. Gradziel, T. Sobota, D. Taler, Identification of local heat flux to membrane water-walls in steam boilers, *Fuel* 88 (2009) 305–311, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2008.08.011>
- [8] Howlader, S., Moharana, S. & Das, M.K. Aspects of Two-Phase Flow Boiling Heat Transfer inside Tube of Water Tube Boiler—A Numerical Study. *J. Engin. Thermophys.* 32, 340–359 (2023). <https://doi.org/10.1134/S1810232823020108>
- [9] Jegla Z., Fialova D., Development of heat and fluid flow distribution modelling system for analysing multiple distributed designs of process and power equipment, *Chemical Engineering Transactions*, 70, 2018, 1471-1476 <https://doi.org/10.3303/CET1870246>
- [10] P.U. Sunil, J. Barve, P.S.V. Nataraj, Mathematical modeling, simulation and validation of a boiler drum: Some investigations, *Energy* 263 (2023) 125836, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125836>

3. Полазне хипотезе

Пројектовање високотемпературских апарата и уређаја код којих се у ложишту сагоревају течна и гасовита горива подразумева коришћење аналитичких и нумеричких модела. У зависности колико је модел прецизан, робустан и свеобухватан, решење ће бити поузданије и економичније, тј. ефективније. У досадашњој инжењерској пракси, врло често је коришћен модел идеалног мешања који је прилично конзервативан, што подразумева већи степен сигурности код пројектовања. То даље значи да ће иницијални инвестициони трошкови бити виши. У савременој инжењерској пракси тежи се да се степен сигурности, снизи, односно да се прорачунска метода приближи што реалнијим условима рада. Зато је важно да се стално унапређују модели који се користе код прорачунавања, у овом случају високотемпературских апарата.

Математички модел заснован на принципу идеалног мешања, тј. клипног струјања, флуида треба да покаже да у перспективи представља одговарајући начин димензионисање високотемпературских апарата у процесној техници. При томе, процеси и феномени који се истражују у овој докторској дисертацији односе се на

реалан материјални систем и засновани су на моделирању са иницијално постављеним следећим хипотезама:

- у вертикалном апарату, између хоризонталних слојева дуж висине апарата размена топлоте зрачењем постоји између суседних хоризонталних слојева димних гасова, као и између димних гасова и зидова ложишта, при чему:
 - аналитички модел у зрачећој зони високотемпературских апарата претпоставља да се размењена количина топлоте одиграла механизмом зрачења, док се конвективни механизам транспорта количине топлоте може занемарити,
 - аналитички метод као интегрални метод претпоставља границе интегралне температуре од улазне, тј. температуре сагоревања, до температуре на излазу из ложишта,
 - средња температура запрљане површине цеви код аналитичког модела апроксимирана је средњом аритметичком температуром између температуре зида запрљане цеви са спољашње стране и зида цеви са унутрашње стране;
- математички модел клипног кретања је неопходно верификовати на конкретном случају индустријског уређаја на основу експерименталних истраживања те се након тога може извршити дискретизација преко контролних запремина,
- модел зрачења је модел сивог тела, где се апсорпција, рефлектовање и емитовање зидова ложишта одвија по принципу сивог тела.

4. Научне методе истраживања

Методе истраживања обухватају:

- критички осврт на постојеће методе прорачуна високотемпературских операција и апарата,
- теоријске формулације математичких модела на основу сопствених истраживања,
- спровођење мерења на постојећем високотемпературском уређају индустријског типа,
- структурно дефинисање величина од значаја и њихово функционално повезивање у бездимензионе бројеве,
- аналитичку и нумеричку анализу расподела температура, топлотог флукса и токова процесних флуида,
- статистичку анализу и оцену резултата примењених модела у односу на експерименталне резултате.

5. Очекивани научни допринос

Очекивани научни допринос произилази из споменутих циљева. У оквиру дисертације ће бити спроведена детаљна анализа прорачунских процедура размењеног топлотног флукса и токова процесних флуида код високотемпературских процесних апарата и биће предложени модификовани математички модел заснован на клипном струјању флуида, са циљем унапређења тачности предвиђања температурског и брзинског поља тј. процесних перформанси високотемпературских апарата.

Стручни допринос се састоји у томе да се омогући брза идентификација проблематичних подручја у току процеса пројектовања и касније током рада

високотемпературског апарата (апсорбованог топлотног флуksа, задржања цеви, утицај поставке горионика, могућа критична места прегревања и други проблеми везани за неуниформну расподелу температуре, превасходно у ложишту). Резултати треба да укључе закључке везане за адекватност математичког модела за широки опсег радних режима и проверу валидности изведених прорачунских процедура експерименталним резултатима.

Закључно, научно-стручни допринос ове дисертације огледа се у формулисању предиктивних динамичких модела високотемпературских операција и апарата у процесном инжењерству ради побољшања праћења и предвиђања рада оваквих система.

6. План истраживања и структура рада

Након детаљне анализе расположивих библиографских јединица које су референтне за предметну област истраживања високотемпературских операција и апарата у процесном инжењерству, биће извршена систематизација аналитичких, нумеричких и експерименталних приступа и до сада остварених резултата и класификација смерница за будућа истраживања.

Даљи план истраживања током израде докторске дисертације може се разврстати у следеће главне активности:

- преглед и систематизација постојеће научне литературе;
- одабир и развој одговарајућих прорачунских модела;
- спровођење експерименталних истраживања;
- спровођење нумеричких анализа;
- упоредна анализа нумеричких и експерименталних резултата;
- дискусија са извођењем закључака и препорукама за будућа истраживања.

Предвиђено је да докторска дисертација има следећу структуру:

1. Увод.
2. Преглед доступне литературе и досадашњих релевантних истраживања.
3. Преглед и анализа аналитичких метода.
4. Преглед и анализа експерименталних метода.
5. Преглед и анализа нумеричких метода.
6. Упоредивање аналитичких, нумеричких и експерименталних резултата.
7. Закључак и дискусија.
8. Литература.

7. Закључак и предлог

На основу свега наведеног, пријаве за израду докторске дисертације архивирани под бројем 510/1 од 20.03.2024. године и уз сагласност Катедре за процесну технику и заштиту животне средине архивирани под бројем 510/2 од 10.04.2024. године, Комисија за писање реферата о научној заснованости теме докторске дисертације сматра да је кандидаткиња испунила потребне услове за пријаву теме докторске дисертације, као и да је способна да реализује наведене предвиђене циљеве истраживања. Предложена тема докторске дисертације је изузетно актуелна, интересантна, мултидисциплинарна, амбициозна и погодна за израду докторске дисертације, те се њеним изучавањем може се остварити значајан научни и стручни допринос. Комисија предлаже Наставно-научном већу Машинског факултета у Београду да се

Милици Ивановић, маг. инж. маш.

одобри израду докторске дисертације под називом

„Напредно интегрално и нумеричко моделирање високотемпературских операција и апарата у процесном инжењерству“

која припада научној области: машинство, и ужој научној области: процесна техника, а за коју је матичан Универзитет у Београду – Машински факултет.

За ментора рада предлажемо **др Србислава Генића**, редовног професора Универзитета у Београду – Машинског факултета и **др Милену Отовић**, доцента на Универзитету у Београду – Машинском факултету.

Београд, 05.06.2024. године

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

.....
проф. др Мирјана Стаменић,
Универзитет у Београду – Машински факултет

.....
проф. др Александар Симоновић,
Универзитет у Београду – Машински факултет

.....
ван. проф. др Урош Милованчевић,
Универзитет у Београду – Машински факултет

.....
ван. проф. Јелена Сворцан,
Универзитет у Београду – Машински факултет

.....
доц. др Игор Мујан,
Универзитет у Новом Саду,
Факултет техничких наука