

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)

379/5

(Број захтева)

30.03.2017. 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:

ИВАН (ДРАГАН) ТОМАНОВИЋ

(име, име једног од родитеља и презиме)

КАНДИДАТ **ИВАН (ДРАГАН) ТОМАНОВИЋ** уписан на Докторске студије 2010 год.

(име, име једног од родитеља и презиме)

Поднео је захтев за израду докторске дисертације:

**МОДЕЛИРАЊЕ ПРОЦЕСА ОДСУМПОВАЊА ГАСОВА УНОШЕЊЕМ СПРАШЕНОГ СОРБЕНТА У
ЛОЖИШТЕ ЕНЕРГЕТСКОГ КОТЛА НА УГЉЕНИ ПРАХ**Универзитет је дана 15.09.2014. год. својим актом под бр. 61206-3937/2-14 дао сагласност на предлог теме докторске дисертације која је гласила:**МОДЕЛИРАЊЕ ПРОЦЕСА ОДСУМПОВАЊА ГАСОВА УНОШЕЊЕМ СПРАШЕНОГ СОРБЕНТА У
ЛОЖИШТЕ ЕНЕРГЕТСКОГ КОТЛА НА УГЉЕНИ ПРАХ**Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата: **ИВАНА (ДРАГАН) ТОМАНОВИЋА**

(име, име једног од родитеља и презиме)

Образована је на седници одржаној 02.03.2017. године, одлуком факултета под бр. 379/3, у саставу:

Име и презиме члана комисије	звање	научна област	установа у којој је запослен
1. Др Драган Туцаковић	Ред. проф.	Термотехника	Машински факултет Београд
2. Др Драгослава Стојиљковић	Ред. проф.	Технологија материјала	Машински факултет Београд
3. Др Срђан Белошевић	Научни саветник	Енергетика и енергетска ефикасност	ИНН Винча Београд

Наставно-научно веће факултета прихватило је извештај Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације на седници одржаној дана 30.03.2017. године.ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТАпроф. 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: 379/5
Датум: 30.03.2017. 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 63. Статута Машинског факултета (број 1876/1 од 04.10.2013. године) и члана 37. Правилника о докторским студијама Машинског факултета и реферата Комисије у саставу: др Драган Туцаковић, ред. проф., ментор, др Драгослава Стојиљковић, ред. проф. и др Срђан Белошевић, научни саветник, ИНН Винча Београд о оцени докторске дисертације „Моделирање процеса одсумпоравања гасова уношењем спрашеног сорбента у ложиште енергетског котла на угљени прах“ студента докторских студија **Ивана Томановића, дипл. инж. маш.**, Наставно-научно веће Машинског факултета на седници одржаној 30.03.2017. године, донело је следећу

ОДЛУКУ

Усваја се реферат Комисије о урађеној докторској дисертацији **„МОДЕЛИРАЊЕ ПРОЦЕСА ОДСУМПОРАВАЊА ГАСОВА УНОШЕЊЕМ СПРАШЕНОГ СОРБЕНТА У ЛОЖИШТЕ ЕНЕРГЕТСКОГ КОТЛА НА УГЉЕНИ ПРАХ“** студента **ИВАНА ТОМАНОВИЋА, дипл. 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

ВЕЋУ ДОКТОРСКИХ СТУДИЈА

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата
Ивана Д. Томановића, дипл. инж. маш., студента докторских студија

Одлуком број 379/3 од 02.03.2017. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације под насловом

„МОДЕЛИРАЊЕ ПРОЦЕСА ОДСУМПОВАЊА ГАСОВА УНОШЕЊЕМ СПРАШЕНОГ СОРБЕНТА У ЛОЖИШТЕ ЕНЕРГЕТСКОГ КОТЛА НА УГЉЕНИ ПРАХ“

кандидата Ивана Д. Томановића, дипл. инж. маш., студента докторских студија.

Након прегледа достављене дисертације и других пратећих материјала, као и разговора са кандидатом, Комисија је сачинила следећи

Р Е Ф Е Р А Т

1. УВОД

1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

На докторске студије на Машинском факултету, кандидат Иван Д. Томановић уписан је 2010. године, по наставном плану који је Сенат Универзитета прихватио 2007. године на основу Закона о високом образовању из 2005. године, а по којем докторске студије не могу трајати дуже од 6 година. По овим правилима, Иван Д. Томановић има обавезу да дисертацију одбрани до 30. септембра 2016. године.

На молбу кандидата Ивана Д. Томановића, Решењем број 2405/1 од 30.09.2016. године, сагласно одредбама Статута Универзитета у Београду, рок за одбрану дисертације је продужен за два семестра – до 30. септембра 2017. године.

По захтеву кандидата Ивана Д. Томановића број 1356/1 од 30.06.2014. године, и предлога проф. др Драгана Туцаковића и сагласности Катедре за термотехнику одржане 07.07.2014. године, да му се одобри пријава теме докторске дисертације и именује Комисија за оцену испуњености услова кандидата и научне заснованости теме докторске дисертације, Наставно-научно веће Машинског факултета у Београду донело је Одлуку број 1356/3 од 17.07.2014. године којом се прихвата тема докторске дисертације и именује ментор проф. др Драган Туцаковић и Комисија за оцену испуњености услова кандидата и научне заснованости теме докторске дисертације у саставу:

- проф. др Драган Туцаковић, Универзитет у Београду, Машински факултет
- проф. др Драгослава Стојиљковић, Универзитет у Београду, Машински факултет
- др Срђан Белошевић, научни саветник, Универзитет у Београду, Институт за нуклеарне науке Винча

На основу извештаја Комисије бр. 1356/5 од 04.09.2014. године и одлуке ННВ поднет је захтев Машинског факултета Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду које је на седници одржаној 15.09.2014. године донело Одлуку да се даје сагласност на предлог теме докторске дисертације Ивана Д. Томановића, дипл.инж.маш., а на основу чега је Декан Машинског факултета у Београду донео Закључак број 1356/7 од 16.09.2014. године о одобравању рада на теми докторске дисертације **„Моделирање процеса одсумпоровања гасова уношењем спрашеног сорбента у ложиште енергетског котла на угљени прах“** под менторством проф. др Драгана Туцаковића.

На основу обавештења проф. др Драган Туцаковића, ментора, да је докторанд Иван Д. Томановић, дипл.инж.маш. завршио докторску дисертацију под називом **„Моделирање процеса одсумпоровања гасова уношењем спрашеног сорбента у ложиште енергетског котла на угљени прах“**, предлога Катедре за термотехнику, Наставно-научно веће Машинског факултета донело је Одлуку број 379/3 од 02.03.2017. године о именовању Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације у саставу:

- проф. др Драган Туцаковић, ментор, Универзитет у Београду, Машински факултет
- проф. др Драгослава Стојиљковић, Универзитет у Београду, Машински факултет
- др Срђан Белошевић, научни саветник, Универзитет у Београду, Институт за нуклеарне науке Винча

1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација Ивана Д. Томановића, под насловом **„Моделирање процеса одсумпоровања гасова уношењем спрашеног сорбента у ложиште енергетског котла на угљени прах“**, припада области техничких наука – машинство, ужа научна област термотехника, за коју је матичан Машински факултет Универзитета у Београду.

Израдом докторске дисертације руководио је др Драган Туцаковић, редовни професор групе предмета везаних за парне котлови и шеф Катедре за термотехнику Машинског факултета Универзитета у Београду.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Кандидат Иван Д. Томановић, дипл. инж. маш., студент докторских студија, рођен је 16. марта 1986. године у Београду, Република Србија. Основну школу похађао је у Земуну. Матурирао је на природно-математичком смеру Земунске Гимназије. Практични део матурског рада је урадио на Технолошко-металуршком факултету Универзитета у Београду. Машински факултет Универзитета у Београду уписао је школске 2005/2006. године. Основне академске студије (ОАС) је завршио школске 2007/2008. године. Мастер академске студије (МАС) на истом факултету је завршио 2009/2010. године одбраном дипломског рада из уже области термотехника. Докторске студије (ДС) на Машинском факултету Универзитета у Београду је уписао школске 2010/2011. године.

Од 01.10.2010. године је запослен у Лабораторији за термотехнику и енергетику (ЈТЕ140) Института за нуклеарне науке „Винча“ Универзитета у Београду, у звању истраживач приправник на пројекту ТР-33018 „Повећање енергетске и еколошке ефикасности процеса у ложишту за угљени прах и оптимизација излазне грејне површине енергетског парног котла применом сопствених софтверских алата“ реализованог у оквиру Института за нуклеарне науке „Винча“, под покровитељством Министарства просвете, науке и технолошког развоја. Одлуком Научног већа Института за нуклеарне науке „Винча“ о

стицању истраживачког звања број 640/19 од 02.04.2015. године изабран (реизбор) је у истраживачко звање истраживач сарадник.

У оквиру научно-истраживачке делатности и рада на пројекту аутор је, или коаутор 9 радова у научним часописима са SCI листе, од тога 2 у категорији M21a, 1 у категорији M21, 2 у категорији M22 и 4 у категорији M23. Поред тога аутор је, или коаутор и 21 рада на међународним научним скуповима штампана у целини и 1 рада штампаног у изводу, као и 1 техничког решења.

Кандидат течно говори енглески и служи се немачким језиком на основном нивоу. У свакодневном раду користи програмски језик FORTRAN и Lazarus FreePascal IDE, а употребљава и програмске пакете за обраду текста (MS Office, LibreOffice), графике (AutoCAD, Gimp, InkScape), поред тога, познаје основе програмских и скриптинг језика C, Pascal, Java и Google Script, као и основе web орјентисаних језика (html5, css3, javascript, php) и база података (MySQL).

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација Ивана Д. Томановића, дипл. инж. маш., под називом: „Моделирање процеса одсумпоравања гасова уношењем спрашеног сорбента у ложиште енергетског котла на угљени прах“, написана је на српском језику, ћириличним писмом. Садржи 186 страна формата A4, 46 слика, 27 табела, 139 нумерисаних израза и списак литературе на 11 страна.

Дисертација садржи следећа поглавља:

1. Увод;
2. Проблем аерозагађења;
3. Преглед постојећих модела и досадашњих истраживања;
4. Математички модел процеса и нумерички код;
5. Валидација модела реакција честица сорбента у лабораторијским условима;
6. Нумеричке симулације комплексних процеса у ложишту и оптимизација предметног поступка одсумпоравања;
7. Утицај на енергетску ефикасност котла;
8. Закључак.

Осим наведеног, дисертација садржи резиме на српском и енглеском језику, садржај, номенклатуру, прилог, као и биографију аутора и изјаву о ауторству, изјаву о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада и изјаву о коришћењу.

2.2. Кратки приказ појединих поглавља

У првом поглављу је наглашен утицај развоја и доступности рачунарских технологија на приступ значајним прорачунским могућностима корисницима којима то раније није било могуће, као и уопштено могућност задовољења захтева и потреба шире научно-истраживачке заједнице при решавању хардверски захтевних проблема на личним рачунарима, некада везаних искључиво за употребу супер рачунара. Сходно томе, наглашава се и значај рачунарске технике у савременим анализама свих енергетских постројења, у свим фазама њиховог развоја и животног века. Указано је на проблем аерозагађења уз цитирање референци из доступне релевантне литературе, и чињеницу да енергетски парни котлови имају значајан удео у подмирењу енергетских потреба на глобалном нивоу и, уколико нису предузете одговарајуће мере, могу представљати један од највећих извора енергетског

загађења. Наглашено је да алтернативни извори електричне енергије, обзиром на доступне капацитете не могу у потпуности заменити фосилна горива у дужем временском периоду, услед чега је оправдано тежити даљем усавршавању енергетских парних котлова, како у погледу ефикасности, тако и у смислу утицаја на животну средину. Приказан је кратак преглед доступних технологија за смањење емисије оксида сумпора, уз осврт на могућности и ограничења. Након тога се разматрају уопштено врсте математичких модела, према заступљености и намени, као и њихове могућности и ограничења.

Затим су дефинисани предмет, научне методе и циљеви истраживања, који обухватају развој модела и рачунарског кода за симулацију сложених процеса унутар котловског ложишта при одсумпоравању ложишних гасова директним уношењем спрашеног сорбента на бази калцијума у ложиште парног котла кроз све фазе истраживања.

У наставку је разматран научни допринос дисертације и потенцијалне примене развијеног софтвера. Разматра се до сада решена проблематика и објашњава потреба за моделом реакција честица сорбента и његова уградња у постојећи сопствени софтверски алат развијен у оквиру ранијих истраживања. Наглашава се потреба примене тродимензионалних модела ложишта, обзиром на сложеност процеса који се одвијају у ложишту и које поједностављени модели не могу да опишу. Описује се значај изведене комплексне нумеричке анализе, као и научни доприноси дисертације.

У другом поглављу се детаљније разматра проблем аерозагађења, узроци настанка аерозагађења као и законске регулативе унутар Европске Уније и Републике Србије које се односе на граничне вредности емисија штетних једињења из стационарних извора уз цитирање доступне литературе. Пореде се доступне методе за умањење емисије оксида сумпора и групишу се према месту на коме се врши уклањање оксида сумпора – пре процеса сагоревања, у току процеса сагоревања или након процеса сагоревања уз цитирање одговарајуће литературе која се односи на појединачне методе.

Приказује се предметни поступак уношења спрашеног сорбента у ложиште или канале парног котла и анализира се процес, предности и мане директног уношења у ложиште и наводе се радови где је такав процес приказан и пореде се предности и недостаци у односу на уношење у гасне канале који се по току димних гасова налазе иза ложишта.

У трећем поглављу је дат преглед постојећих модела реакција честице, које подразумевају три одвојена процеса: калцинацију честице сорбента услед које долази до наглог пораста унутрашње реактивне површине, синтеровање материјала унутар честице услед дејства високих температура, и реакцију сулфатизације током које долази до везивања оксида сумпора са калцијумом из честица сорбента. Појединачно се разматрају модели сваке реакције – процеса код различитих аутора и пореде се сличности и разлике у приступу моделирању реакција у доступним радовима у литератури код различитих аутора. Потом се на основу потреба, предности и недостатака одређених модела врши одабир модела који се може користити за анализу и решавање конкретног проблема.

У четвртном поглављу пажња је посвећена математичком моделу процеса, основним претпоставкама на којима се модел заснива и нумеричким аспектима имплементације модела. Приказане су основне једначине механике флуида и њихови облици погодни за имплементацију у нумерички код, као и додатни чланови у једначинама, који постоје услед међусобних интеракција гаса и дисперзне фазе. Разматра се коришћени $k - \varepsilon$ модел турбуленције. Међусобни утицај фаза у двофазном току и моделирање кретања честица су приказани након објашњења основних једначина и модела турбуленције. Следи део о основама радијационе размене топлоте, и објашњење поставки граничних и почетних услова, са референцама. Потом је пажња посвећена размени масе у двофазном току и хетерогеним хемијским реакцијама, праћено конкретним објашњењем употребљеног модела угљеног

праха. Следе поглавље о моделирању реакција формирања и деструкције оксида азота, а након њих опис термодинамичких и транспортних својстава смеше.

У наставку поглавља је дат извод из нумеричких метода и аспеката проблема, са изводима из приступа моделирању једначина и итеративног поступка решавања проблема.

Посебан део је посвећен математичком опису и физичкој позадини одабраних модела реакција честица сорбента при одсумпоравању и тој тематици је очекивано посвећена посебна пажња. Приказани су механизми реакција честица сорбента, уз цитирање релевантне доступне литературе, као и формулација тих модела.

У петом поглављу, после формулације сваког модела, дати су резултати симулација на дводимензионалном каналу – реактору, моделираном према облику реактора на коме су вршени експерименти из литературе, са одговарајућим саставом и протоком гасне смеше, ради валидације модела. На дијаграмима се пореде резултати добијени нумеричком симулацијом реакција честице сорбента унутар канала – реактора са експерименталним подацима и приказују добра слагања како са експерименталним подацима, тако и са доступним подацима за примену конкретних модела на једној честици у литератури без нумеричких симулација механике флуида.

У шестом поглављу се приказују нумеричке симулације процеса на ложишту парног котла. Проверен је утицај мреже на резултате прорачуна, модел реакција настајања сумпора из угљеног праха је проверен са доступним резултатима мерења на предметном ложишту парног котла, без уношења сорбента.

Приказан је кориснички интерфејс за управљање развијеним софтвером. Набројани су битни параметри предметног процеса одсумпоравања које је потребно разматрати ради детаљне и ваљане анализе целог процеса. Разматрана је оправданост употребе честица величине 100 μm и показано је да није исплативо применити релативно крупне честице сорбента. С тога је извршено моделирање реакција са релативно ситним честицама сорбента реда величине 10 μm . Приказан је утицај моларног односа калцијума из сорбента и сумпора из горива, утицај различитих расподела сорбента по висини, уношење кроз горионике и отворе изнад горионичких пакета, и време боравка честице сорбента, уз напомену да у сложеним условима, који владају унутар котловског ложишта није могуће изоловати један параметар и само њега анализирати, већ се променом једног параметара, последично мењају и други. Анализиран је и утицај промена које изазива уношење честица сорбента на поље температура унутар ложишта парног котла, као и утицај на формирање и деструкцију оксида азота.

У седмом поглављу је наглашен утицај примене предметног поступка одсумпоравања на промене излазне температуре на крају ложишта и на промене у излазној температури на крају котла која се може добити термичким прорачуном.

У осмом поглављу дисертације дат је закључак о приказаним и анализираним резултатима, извршена је синтеза парцијалних закључака о резултатима истраживања у претходним поглављима дисертације. Дат је осврт на развој програма и процес који је претходио. Изнети су детаљни закључци са критичком анализом остварених резултата истраживања. Наглашени су свеукупни позитивни утицаји уношења спрашеног сорбента на емисију оксида сумпора добијени нумеричким симулацијама и потенцијал примене технологије. Указано је на правце оптимизације процеса уколико би технологија била примењена на предметном ложишту. Истакнут је научни допринос дисертације као и могућност примене остварених резултата приликом решавања конкретних инжењерских проблема.

Након осмог поглавља налазе се Номенклатура, Литература и Прилог.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Угаљ, као енергент који и даље нема праву алтернативу у погледу заступљености и количине енергије коју даје у односу на уложено, ствара еколошке проблеме током експлоатације у погледу емисија штетних једињења и проблеме друге природе. У оквирима Републике Србије, електране на угљени прах дају приближно 65% укупне произведене електричне енергије, док преосталу количину највећим делом покривају хидроелектране, а у мањој количини остали извори енергије.

Тренутна потрошња угља, доступне резерве и дугорочни планови наговештавају да у скорије време неће доћи до значајних промена у потрошњи овог енергента, те је оправдано планирати и инвестирати у смањење утицаја које рад постројења оставља на животну средину. То се у највећој мери односи на емисије оксида азота и сумпора, с обзиром да су једни од главних узрочника појава киселих киша и фотохемијског смога. Стратегије развоја, којима су планиране ревитализације блокова, као и изградња нових, морају, поред планираних, уобичајених захтева за сигурним и ефикасним радом, уз постизање задатог капацитета, задовољити и еколошке захтеве у погледу ограничавања емисија штетних гасова у околину.

С обзиром на сложеност процеса који се одвијају током сагоревања угљеног праха у ложишту парног котла није могуће једноставним методама проценити излазне садржаје загађивача у димном гасу. С обзиром да постоји потреба за анализом излазних садржаја ових једињења, мора се прибећи математичком моделирању струјнотермичких процеса у тродимензионалном моделу ложишта код којих се анализира могућност примене и оптимизације одређене технологије. Нумеричке методе, у савременој науци, уз доступност експерименталних података постају незамењив алат у свим периодима радног века постројења.

Тема истраживања дисертације обухвата развој математичког модела и рачунарског кода за симулацију комплексних процеса при одсумпоравању ложишних гасова применом поступка додавања спрашеног сорбента на бази калцијума у ложиште парног котла за сагоревање угљеног праха, нумеричку анализу процеса и испитивање могућности оптимизације предметног поступка одсумпоравања у разматраном ложишту парног котла ТЕ Костолац Б2. Директно уношење сорбента у ложиште парног котла ради смањења емисије оксида сумпора је мање заступљена технологија од конкурентних скруберских поступака. У односу на скруберске поступке има мању ефикасност, али због знатно веће економичности примену налази и као самостална технологија, и у комбинацији са скруберским методама где може водити ка смањењу потребних капацитета скрубера, односно код влажних поступака смањењу потрошње воде, што се може показати као битно на местима где је вода доступна у ограниченим количинама и значајна је њена уштеда у току процеса.

С обзиром на енергетске потребе у будућности, планиране нове и унапређење постојећих електрана, тема истраживања у дисертацији је савремена и значајна с обзиром да је потребно уложити значајне напоре у еколошке аспекте постројења, тј. у смањење емисија штетних једињења из енергетских парних котлова. Истраживање управо пружа увид у један од праваца развоја и унапређење постојећих постројења, кроз анализу и оптимизацију поступка одсумпоравања ложишних гасова.

У оквиру дисертације кандидат је развио и унапредио различите моделе процеса и прорачуна, и ствара оригиналан комплексан и обједињен прорачунски модел процеса који обухвата праћење честица и реакције сагоревања угљеног праха, затим праћење честица и

реакције сорбента, као и моделе процеса струјања и размене топлоте унутар ложишта. Модел је омогућио анализу уношења спрашеног сорбента у ложиште енергетског парног котла у веома сложеним условима током сагоревања угљеног праха. Имплементација модела у оквиру комплексног нумеричког кода је проверена са доступним експерименталним резултатима. Поред прорачунског модела, кандидат је развио и пропратни кориснички интерфејс за задавање улазних параметара и праћење рада модела. Развијени прорачунски модел процеса и пратећи програм и интерфејс су постављени као основа комплексне нумеричке анализе која је изведена у докторату. Кандидат је анализирао уношење сорбента у ложиште парног котла у условима различите организације сагоревања, са различитим горивима, као и при различитој расподели сорбента по етажама горионика и при уношењу кроз посебне отворе изнад горионичких пакета. Потреба за оваквом анализом проистекла је из чињенице да је тешко предвидети понашање честица сорбента у самом ложишту. Анализиран је утицај места уношења сорбента, поља концентрације оксида сумпора, температурског поља, времена боравка честица сорбента, као и дистрибуције честица, на промене у излазном садржају оксида сумпора, као и промене које је уношење сорбента изазвало у осталим аспектима рада ложишта. Анализама је показано да се уз оптимизацију предметног процеса може остварити знатно смањење садржаја оксида сумпора у самом ложишту, а приказан је и значај добре организације процеса на крајњи исход смањења емисије. Излазне податке из прорачуна је могуће користити у даљем термичком прорачуну постројења и добити свеобухватну слику понашања постројења у току рада.

Резултат истраживања је развој и дефинисање тродимензионалног нумеричког модела и одговарајућег пропратног корисничког интерфејса, на стварној геометрији предметног парног котла, који могу да помогну при процени могућности потенцијалне примене поступка одсумпоравања директним уношењем спрашеног сорбента у ложиште домаћег енергетског парног котла блока ТЕ Костолац Б2. Резултати симулација су допринели бољем разумевању процеса који се одвијају унутар предметног ложишта у случају примене разматраног поступка. Анализе и примена нумеричких метода приликом планирања је од значаја, како при подизању свести о проблему и потенцијалном решењу, тако и при одлучивању о даљим правцима развоја.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Списак литературе која је коришћена приликом израде дисертације дат је у посебном одељку рада. Литература обухвата радове и књиге који се односе на основе механике флуида, нумеричку механику флуида, сагоревање лигнита, реакције једињења азота приликом сагоревања, као и ослобађање оксида сумпора и реакција са честицама сорбента. Прегледом листе коришћених радова закључује се да је кандидат имао на располагању и проучио доступну референтну литературу. Она је била полазна основа за приказ постојећег стања у области истраживања, али и основа за избор поступка моделирања процеса сложеног котловског постројења. У дисертацији је коришћено укупно 142 референце које су највећим делом савремени радови објављени у часописима или фундаментални радови који су дали добар основ савременом решавању проблема.

У оквиру дисертације кандидат се позива на анализе, резултате и закључке објављене у референтним докторским дисертацијама, стручним уџбеницима, радовима у међународним часописима и релевантним стандардима из области процене рада котлова. Кандидат је коректно проучио и цитирао наведене изворе.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Методе које су коришћене у току реализације истраживања обухватају:

- систематски приступ и класификацију доступне литературе кроз критичку анализу и међусобно поређење различитих приступа моделирању разматраних процеса и хемијских реакција; избор оптималних модела калцинације, синтеровања и сулфатизације честице сорбента;
- верификацију нумеричког кода;
- валидацију развијеног модела процеса са реакцијама честица сорбента, поређењем са доступним референтним експерименталним или нумеричким резултатима из литературе;
- математичко моделирање разматраних комплексних процеса у предметном ложишту котла са сагоревањем угљеног праха током примене предметног поступка одсумпоравања;
- нумеричку студију посматраних процеса и појава у разматраној геометрији, нумеричке експерименте и параметарску анализу.

3.4. Примењивост остварених резултата

Примењеним моделима изведена је опсежна нумеричка студија могућности имплементације директног уношења спрашеног сорбента у ложиште парног котла ради смањења емисије оксида сумпора. Добијени резултати се могу употребити при одлучивању о правцима будућег развоја и унапређења предметног парног котла, али и других котловских постројења сличне конструкције. Уз експериментална мерења, уколико би технологија била имплементирана, добијени резултати симулација и развијени програми могу бити од користи при анализи понашања котловских ложишта при различитим радним режимима.

Омогућена је анализа процеса уношења сорбента кроз посебне отворе изнад горионичких пакета, као и анализа уношења сорбента кроз појединачне етаже горионика заједно са угљеним прахом, односно више етажа одједном или комбиновано кроз посебне отворе и етаже горионика. Ово је од посебног значаја уколико се посматра утицај положаја пламена и уношења горива различите топлотне моћи на понашање сорбента и крајњи учинак у погледу смањења емисије оксида сумпора.

Развијени софтвер и кориснички интерфејс омогућавају инжењерском особљу извођење сложених анализа и дају излазне резултате које је могуће поредити са мерењима на постројењу. Такође, значајно је и то што се као излаз добијају и поља векторских и скаларних величина у самом ложишту, стварајући слику о стању и процесима који се одвијају унутар њега, а које је тешко или немогуће сагледати на друге начине.

Поред симулација процеса одсумпоравања, програм може да ради и у режиму без уношења сорбента, што омогућава употребу новог корисничког интерфејса и симулацију стварних радних режима на ложишту без модификација, пружајући инжењерском особљу нов алат са савременим корисничким интерфејсом.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Чланови комисије сматрају да је кандидат показао да има смисао и знање неопходно да самостално препозна и систематски решава инжењерске и научне проблеме, примењујући савремене методе теоријског и нумеричког карактера, да користи расположиву литературу и да успешно влада савременим истраживачким методама. Резултати докторске дисертације доказ су способности кандидата за самостални научно-истраживачки рад.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

У оквиру рада на дисертацији потврђена су и проширена постојећа знања и као таква дисертација представља научни допринос у области термотехнике и термоенергетике. Сопствени модели комплетног поступка директног уношења сорбента и читавог комплекса струјнотермичких процеса у ложишту енергетских парних котлова у реалним и променљивим погонским условима се ретко срећу у литератури. Већина расположивих радова у области се односи на модел честица сорбента, или применом комерцијалних софтвера анализира уношење сорбента у ложишта котлова. У докторату се користи сопствени софтверски код развијен у оквиру истраживања. Остварени научни допринос докторске дисертације огледа се у следећем:

- изведен је избор оптималних приступа моделирању процеса и хемијских реакција у посматраном поступку одсумпоравања;
- развијен је сложен рачунарски програм за симулацију разматраног процеса на предметном ложишту;
- осмишљен је алгоритам по коме ради проширен математички модел комплексних процеса са могућношћу праћења процеса одсумпоравања честицама спрашеног сорбента;
- алгоритам је софтверски имплементиран, са одговарајућим моделима комплексних процеса и створен је оригиналан комплексан прорачунски алат за симулације уношења спрашеног сорбента у реална котловска ложишта на примеру ложишта ТЕ Костолац Б2;
- развијен је пратећи кориснички интерфејс ради лакшег управљања програмом и праћења рада програма;
- знатно је побољшано познавање предметног технолошког поступка одсумпоравања ложишних гасова и разумевање потребе за оптималним управљањем процесом због разлика у условима који владају унутар ложишта при различитим радним параметрима;
- изведена је комплексна нумеричка анализа и оптимизација поступка уклањања оксида сумпора додавањем спрашеног сорбента – кречњака или креча у предметно ложиште на угљени прах;
- изведени су закључци о смерницама којима се треба водити приликом употребе технологије на стварним ложиштима и начина на који је потребно водити процес да би се обезбедила добра ефикасност уз максимално искоришћење сорбента;
- уопштено је подигнут ниво знања и разматрања комплексних процеса који се паралелно одвијају унутар ложишта енергетских котлова са примењеном технологијом за смањење емисије оксида сумпора и других загађивача.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Претходно разматрање и анализа постојећих модела реакција честица сорбента је коришћено као основа за одабир и прилагођавање модела нумеричком коду. Модели реакција су одабрани на основу критеријума који представљају добар компромис између тачности резултата и прорачунске ефикасности.

Развој нумеричког кода је текао постепено и симулације су првобитно изведене на дводимензионалним гасним каналима ради провере имплементације и стабилности модела. Постигнута су добра слагања резултата на дводимензионалном каналу са подацима из доступних експеримената.

Након провере модели су имплементирани у тродимензионални нумерички код за прорачун ложишта парног котла и проверена је стабилност модела и утицај мреже на крајње резултате.

Добијени резултати симулација на ложишту са уношењем спрашеног сорбента показали су значајан потенцијал и могућности примене уношења спрашеног сорбента директно у ложиште енергетског котла ради смањења емисије оксида сумпора. Показано је да смањење емисије оксида сумпора умногоме зависи од степена оптимизације предметног процеса уношења сорбента у ложиште, односно од места уношења, времена боравка, температура којима је честица сорбента била изложена, и локалних концентрација оксида сумпора дуж трајекторија којима се крећу честице сорбента.

Показано је да оптимално решење увек представља компромис између различитих захтева и да умногоме зависи од садржаја сагорљивог сумпора у гориву, количине унетог сорбента, локалне температуре и геометрије пламена, одабира места уношења сорбента и параметара које условљава место уношења: време боравка, температурне историје, локалних концентрација сумпор-диоксида и др. Просечно смањење садржаја оксида сумпора у најнеповољнијим случајевима износи у просеку 11%, док је код најповољнијих смањење изнад 55% на излазу из ложишта. Правилно вођење процеса као предуслов оптимизације уношења сорбента подразумева да се приликом одабира места и начина уношења сорбента анализирају поља температура, концентрација оксида сумпора и кисеоника, и да се у зависности од њих одабере оптимално место уношења где честице сорбента улазе у зоне богате оксидима сумпора, а при томе нису изложене интензивном синтеровању (превисоким температурама).

У резултатима је надаље приметно да постоји одређен утицај уношења сорбента на излазну температуру на крају ложишта и мањи, посредан утицај на емисију оксида азота.

Развијени кориснички интерфејс омогућава лак преглед унетих улазних података, као и праћење конвергенције решења у реалном времену.

Резултати добијени симулацијама, као и сам програм представљају одличну полазну подлогу за детаљне анализе у комбинацији са мерењима на стварном постројењу, и могу представљати значајан алат при пројектовању нових, односно ревитализацији и вођењу постојећих постројења.

Развијени сложени модел који обједињује све значајне процесе, приказан у дисертацији са пратећим програмом је омогућио симулације веома сложених процеса који се одвијају унутар котловског ложишта приликом уношења спрашеног сорбента у ложиште енергетског парног котла у реалним условима. Олакшана комуникација корисника са програмом путем корисничког интерфејса чини овај модел и програм погодним и за употребу од стране инжењерског особља као погодан алат за анализу процеса.

4.3. Верификација научних доприноса

Део доприноса докторске дисертације верификован је радовима које је кандидат публиковао у међународним часописима који је на SCI листи, радом у којем је примењен модел у делу анализа које се односе на емисију оксида сумпора и неколико радова саопштених на скуповима од међународног значаја:

Kategorija M21a

1. Belošević, S., **Tomanović, I.**, Crnomarković, N., Milićević, A., Tucaković, D., *Numerical study of pulverized coal-fired utility boiler over a wide range of operating conditions for in-furnace SO₂/NO_x reduction*, Applied Thermal Engineering, Vol. 94, p. 657-669, 2016, IF(2015)=3.043, ISSN 1359-4311
2. Belošević, S., **Tomanović, I.**, Beljanski, V., Tucaković, D., Živanović, T., *Numerical prediction of processes for clean and efficient combustion of pulverized coal in power plants*, Applied Thermal Engineering, Vol. 74, p. 102-110, 2015, IF(2015)=3.043, ISSN 1359-4311

Kategorija M22

3. **Tomanović, I.**, Belošević, S., Milićević, A., Crnomarković, N., Tucaković, D., *Numerical tracking of sorbent particles and distribution during gas desulfurization in pulverized coal-fired furnace*, Thermal Science, OnLine-First 2016, doi:10.2298/TSCI160212196T, 2016, IF(2014)=1.222, ISSN 0354-9836

Kategorija M23

4. **Tomanović, I.**, Belošević, S., Milićević, A., Tucaković, D., *Modeling of the reactions of a calcium-based sorbent with sulfur dioxide*, Journal of the Serbian Chemical Society, Vol. 80, No. 4, p. 549-562, 2015, IF(2015)=0.970, ISSN 0352-5139

Kategorija M33

5. **Tomanović, I.**, Belošević, S., Milićević, A., Crnomarković, N., Tucaković, D., *Furnace sorbent injection for SO₂ removal and the effects on combustion and NO_x emission – a numerical study*, Full Papers Proceeding of International Conference "Power Plants 2016", November 2016, Zlatibor Serbia, ISBN 978-86-7877-027-2, pp. 635 – 647
6. **Tomanović, I.**, Belošević, S., Milićević, A., Tucaković, D., *Influence of sorbent particle dispersion in pulverized coal-fired furnace on desulphurization process efficiency*, Full Papers Proceeding of 17th Symposium on Thermal Science and Engineering of Serbia, October 2015, Sokobanja Serbia, ISBN 987-86-6055-076-9, pp. 228 – 235
7. **Tomanović, I.**, Milićević, A., Stojanović, A., Belošević, S., Tucaković, D., *Ca-based sorbent reactions modelling for SO₂ emission reduction in pulverized coal combustion conditions*, Full Papers Proceeding of International Conference "Power Plants 2014", October 2014, Zlatibor Serbia, ISBN 978-86-7877-024-1, pp. 704 – 711
8. **Tomanović, I.**, Belošević, S., Stojanović, A., Tucaković, D., Živanović, T., *Alternative modeling approaches to sulfation reactions of Calcium based sorbents injected in the pulverized coal furnace*, Full Papers Proceeding of 16th Symposium on Thermal Science and Engineering of Serbia, October 2013, Sokobanja Serbia, ISBN 987-86-6055-043-1, pp. 65 – 72
9. Belošević, S., **Tomanović, I.**, Beljanski, V., Sijerčić, M., Tucaković, D., Živanović, T., *Numerical prediction of processes for clean and efficient utilization of pulverized coal in power plants*, USB Proceedings, 6th International Conference on Clean Coal Technologies CCT2013, May 2013, Thessaloniki Grece, <http://www.cct2013.org>, pp. 1-23
10. Tucaković, D., Stupar, G., Živanović, T., Banjac, M., Belošević, S., Crnomarković, N., **Tomanović, I.**, Beljanski, V., *A computer code for the utility boiler thermal calculation*, Full Papers Proceeding of International Conference "Power Plants 2012", November 2012, Zlatibor Serbia, ISBN 978-86-7877-021-0, pp. 948 – 960

11. Tucaković, D., Stupar, G., Živanović, T., Banjac, M., Belošević, S., Crnomarković, N., **Tomanović, I.**, Beljanski, V., Impacts of certain parameters on work efficiency of utility boiler in block 2 TPP Kostolac B, Full Papers Proceeding of International Conference "Power Plants 2012", November 2012, Zlatibor Serbia, ISBN 978-86-7877-021-0, pp. 961 – 971
12. Beljanski, V., **Tomanović, I.**, Belošević, S., Sijerčić, M., Stanković, B., Crnomarković, N., Stojanović, A., Sulfation reaction modeling of Ca-based sorbent, Full Papers Proceeding of International Conference "Power Plants 2012", November 2012, Zlatibor Serbia, ISBN 978-86-7877-021-0, pp. 1001 – 1012
13. **Tomanović, I.**, Beljanski, V., Belošević, S., Sijerčić, M., Stanković, B., Crnomarković, N., Stojanović, A., Modelling and optimisation of desulphurisation process by direct sorbent injection in furnace of pulverised coal utility boiler, Full Papers Proceeding of International Conference "Power Plants 2012", November 2012, Zlatibor Serbia, ISBN 978-86-7877-021-0, pp. 1013 – 1024

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

На основу прегледа и детаљне анализе докторске дисертације под називом „**Моделирање процеса одсумпоравања гасова уношењем спрашеног сорбента у ложиште енергетског котла на угљени прах**“ кандидата Ивана Д. Томановића, дипл. инж. маш., студента докторских студија, Комисија за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације констатује да је урађена докторска дисертација написана према свим стандардима у научно-истраживачком раду, као и да испуњава све услове предвиђене Законом о високом образовању, стандардима и Статутом Машинског факултета у Београду.

На основу резултата и закључака приказаних у докторској дисертацији и чињенице да је анализирана проблематика значајна и актуелна у стручној и научној јавности, констатује се да је кандидат Иван Д. Томановић, дипл. инж. маш., студент докторских студија, успешно завршио докторску дисертацију у складу са предвиђеним предметом и постављеним циљевима истраживања. Кандидат је остварио оригиналне резултате везане за моделирање и анализу процеса при уношењу спрашеног сорбента у ложишта енергетских парних котлова на спрашени угаљ ради редукције емисије оксида сумпора, користећи при том расположиву литературу и резултате експерименталних истраживања. Резултати истраживања су систематично обрађени и на основу њих изведени су вредни закључци о утицајима уношења сорбента, како у погледу смањења емисије оксида сумпора, тако и пропратних ефеката које присуство и реакције честица сорбента имају на поље температуре и друге релевантне параметре процеса у ложишту. Изведена анализа и развијени софтвер представљају користан алат за решавање конкретних инжењерских проблема. Научна и стручна јавност је упозната са резултатима истраживања публикавањем четири рада у међународним часописима (2 рада категорија M21a, 1 рад категорија M22, 1 рад категорија M23), као и 9 радова саопштених на скуповима од међународног значаја штампана у целини (9 радова категорије M33).

Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације закључила је да дисертација представља оригинални научни рад са научним доприносом у области техничких наука, ужа научна област Термотехника, па сагласно томе предлаже Наставно-научном већу Машинског

факултета Универзитета у Београду да прихвати Реферат Комисије и упути га Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду на усвајање, а дисертацију **„Моделирање процеса одсумпоровања гасова уношењем спрашеног сорбента у ложиште енергетског котла на угљени прах“** кандидата Ивана Д. Томановића, дипл. инж. маш., студента докторских студија, стави на увид јавности.

У Београду, 24.03.2017. године

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

проф. др Драган Туцаковић
Универзитет у Београду – Машински факултет

проф. др Драгослава Стојиљковић
Универзитет у Београду – Машински факултет

др Срђан Белошевић, научни саветник
Универзитет у Београду – Институт за нуклеарне науке Винча

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ –
Број:379/5
Датум: 30.03.2017. године
Београд, Краљице Марије бр. 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 63. Статута Машинског факултета (број 1876/1 од 04.10.2013. године) и члана 37. Правилника о докторским студијама Машинског факултета, Наставно-научно веће на седници одржаној 30.03.2017. године, донело је

ОДЛУКУ

Усваја се реферат Комисије о урађеној докторској дисертацији **„МОДЕЛИРАЊЕ ПРОЦЕСА ОДСУМПОВАЊА ГАСОВА УНОШЕЊЕМ СПРАШЕНОГ СОРБЕНТА У ЛОЖИШТЕ ЕНЕРГЕТСКОГ КОТЛА НА УГЉЕНИ ПРАХ“** студента **ИВАНА ТОМАНОВИЋА**, дипл. инж. маш.

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

Универзитет у Београду је својом Одлуком број 61206-3937/2-14, од 15.09.2014. године, дао сагласност на предлог теме докторске дисертације.

Објављени радови студента у часописима међународног значаја:

Категорија M21a

1. Belošević, S., **Tomanović, I.**, Crnomarković, N., Milićević, A., Tucaković, D., *Numerical study of pulverized coal-fired utility boiler over a wide range of operating conditions for in-furnace SO₂/NO_x reduction*, Applied Thermal Engineering, Vol. 94, p. 657-669, 2016, IF(2015)=3.043, ISSN 1359-4311
2. Belošević, S., **Tomanović, I.**, Beljanski, V., Tucaković, D., Živanović, T., *Numerical prediction of processes for clean and efficient combustion of pulverized coal in power plants*, Applied Thermal Engineering, Vol. 74, p. 102-110, 2015, IF(2015)=3.043, ISSN 1359-4311

Категорија M22

3. **Tomanović, I.**, Belošević, S., Milićević, A., Crnomarković, N., Tucaković, D., *Numerical tracking of sorbent particles and distribution during gas desulfurization in pulverized coal-fired furnace*, Thermal Science, OnLine-First 2016, doi:10.2298/TSCI160212196T, 2016, IF(2014)=1.222, ISSN 0354-9836

Категорија M23

4. **Tomanović, I.**, Belošević, S., Milićević, A., Tucaković, D., *Modeling of the reactions of a calcium-based sorbent with sulfur dioxide*, Journal of the Serbian Chemical Society, Vol. 80, No. 4, p. 549-562, 2015, IF(2015)=0.970, ISSN 0352-5139

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

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

проф. др Радивоје Митровић