

## ВЕЋУ ДОКТОРСКИХ СТУДИЈА

**Предмет:** Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата  
Горана М. Ступара, дипл. инж. маш., студента докторских студија

Одлуком број 2629/2 од 24.12.2015. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације под насловом

### **„МОДЕЛИРАЊЕ ПРОЦЕСА У ЕНЕРГЕТСКОМ ПАРНОМ КОТЛУ СА ВИШЕСТЕПЕНИМ ДОВОЂЕЊЕМ ВАЗДУХА ПО ВИСИНИ ЛОЖИШТА“**

кандидата Горана М. Ступара, дипл. инж. маш., студента докторских студија.

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

## РЕФЕРАТ

### 1. УВОД

#### 1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

На докторске студије на Машинском факултету, кандидат Горан М. Ступар 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, Горан М. Ступар има обавезу да дисертацију одбрани до 30. септембра 2016. године.

По захтеву кандидата Горана М. Ступара број 1257/1 од 17.06.2014. године, и предлога проф. др Драгана Туцаковића и сагласности Катедре за термотехнику број 1334/1 од 26.06.2014. године, да му се одобри пријава теме докторске дисертације и именује Комисија за подношење извештаја о прихватању теме, Наставно-научно веће Машинског факултета Универзитета у Београду донело је Одлуку број 1334/2 од 3.07.2014. године којом се прихвата тема докторске дисертације и именује ментор проф. др Драган Туцаковић и Комисија за подношење извештаја о прихватању теме докторске дисертације и њене научне заснованости у саставу:

- проф. др Драган Туцаковић, ментор,
- проф. др Титослав Живановић и
- др Срђан Белошевић, научни саветник.

На основу извештаја Комисије бр. 1334/3 од 11.07.2014. године и одлуке ННВ поднет је захтев Машинског факултета Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду које је на седници одржаној 10.10.2014. године донело Одлуку да се даје сагласност на предлог теме докторске дисертације Горана М. Ступара, дипл. инж. маш., а на основу чега је Декан Машинског факултета у Београду донео Закључак број 2161/1 од 4.11.2014. године о одобравању рада на теми докторске дисертације **„Моделирање процеса у енергетском парном котлу са вишестепеним довођењем ваздуха по висини ложишта“** под менторством проф. др Драгана Туцаковића.

На основу обавештења проф. др Драган Туцаковића, ментора, да је докторанд Горан М. Ступар, дипл. инж. маш. завршио докторску дисертацију под називом **„Моделирање процеса у енергетском парном котлу са вишестепеним довођењем ваздуха по висини ложишта“**, предлога Катедре за термотехнику, Наставно-научно веће Машинског факултета Универзитета у Београду донело је Одлуку број 2629/2 од 24.12.2015. године о именовану Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације у саставу:

- проф. др Драган Туцаковић, ментор,
- проф. др Титослав Живановић и
- др Срђан Белошевић, научни саветник.

### 1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација Горана М. Ступара, под насловом **„Моделирање процеса у енергетском парном котлу са вишестепеним довођењем ваздуха по висини ложишта“**, 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 Енергетски парни котлови и шеф Катедре за термотехнику Машинског факултета Универзитета у Београду. Као аутор или коаутор, публиковао је 15 радова у часописима са SCI листе (12 у категорији M21 и 3 у категорији M23) из области термотехнике и термоенергетике.

### 1.3. Биографски подаци о кандидату

Кандидат Горан М. Ступар, дипл. инж. маш., студент докторских студија, рођен је 15. априла 1986. године у Сарајеву, Босна и Херцеговина. Основну школу похађао је у Београду. Матурирао је на смеру роботика и флексибилни производни системи Политехничке академије. Машински факултет Универзитета у Београду уписао је школске 2005/2006. године. На истом Факултету дипломирао је у јулу 2010. године, на смеру Термотехника, одбраном дипломског рада: „3-Д модел струјања двокомпонентне смеше у колону канала иза вентилаторског млина енергетског парног котла“. Школске 2010/11. године уписао је докторске студије на Машинском факултету Универзитета у Београду.

Од новембра 2010. године запослен је на Машинском факултету Универзитета у Београду на Катедри за термотехнику. У својству асистента, кандидат је активно учествовао у извођењу вежби из предмета Основе парних котлова на основним академским студијама и предмета Елементи и опрема парних котлова, Процеси у парним котловима, Енергетски парни котлови 1 и Енергетски парни котлови 2 на мастер академским студијама. Наставни и педагошки рад кандидата високо је вреднован у анкетама спроведеним међу студентима.

У оквиру научно-истраживачке делатности аутор је више научних и стручних радова објављених у научним и стручним часописима и изложених на симпозијумима у земљи и

иностранству. У области сарадње са привредом учествовао је у изради пројеката, студија и експертиза везаних најчешће за енергетске парне котлове различитих котловска постројења.

Кандидат је коаутор 15 научно-стручних радова, од чега је 3 рада публикувано у научним часописима међународног значаја (у часописима са SCI листе), 3 рада су публикувана у часописима националног значаја, 9 радова саопштених на међународним скуповима и штампаних у целини, 2 техничка решења и 25 оригиналних стручних остварења за потребе привреде. Доминантни део научно-стручних остварења кандидата односи се на топлотне и струјне процесе у енергетским парним котловима. Осим наведеног, кандидат је учествовао и у реализацији научно-истраживачког пројекта ("Повећање енергетске и еколошке ефикасности процеса у ложишту за угљени прах и оптимизација излазне грејне површине енергетског парног котла применом сопствених софтверских алата", евиденциони број: TP-33018) финансираног од стране Министарства за просвету, науку и технолошки развој Републике Србије.

Говори енглески, а служи се руским језиком. У свакодневном раду користи програме за пројектовање и моделирање процеса методом коначних запремина (CATIA, AutoCAD, ANSYS Fluent).

## **2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ**

### 2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација Горана М. Ступара дипл. инж. маш., под називом: „Моделирање процеса у енергетском парном котлу са вишестепеним довођењем ваздуха по висини ложишта“ написана је на српском језику, садржи 200 страна формата А4, 89 слика, 21 табелу, 170 нумерисаних једначина и списак литературе са 80 наслова (8 страна).

Дисертација садржи следећа поглавља:

1. Увод;
2. Опис рада сложеног котловског постројења;
3. Рачунарска механика флуида (computational fluid dynamics - CFD);
4. Зонални модел прорачуна ложишта;
5. Потврда и приказ резултата модела и
6. Закључак.

Осим наведеног, дисертација садржи резиме на српском и енглеском језику, садржај, 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 су дати шири аспекти значаја примене и потреба за истраживањем и оптимизацијом топлотног процеса и процеса сагоревања у ложишту енергетског парног котла са вишестепеним довођењем ваздуха. Наглашен је недостатак метода за процену рада котлова са савременим шемама довођења секундарног ваздуха, а које се примењују у склопу примарних мера редукације азотних оксида. Тако је дефинисан циљ са хипотезама и методама које су примењене у дисертацији, уз допуну приказа тока истраживања и главних фаза спроведених у раду. Представљен је и преглед досадашњих истраживања у овој области кроз анализу најважнијих радова са истицањем достигнућа и ограничења која су постигли поједини аутори. Посебно је наглашен недостатак научних радова који се баве проблемима утицаја примарних мера на топлотни процес у ложишту и рад енергетских парних котлова у

целини. Додатно је указано на основна ограничења метода коришћених за описивање дела процеса код савремених котлова који се примењују за процену садржаја азотних оксида, а која се спроводе путем нумеричке симулације.

У другом поглављу је дат опис основних система и процеса који сачињавају сложено котловско постројење. За потребе предвиђања рада сложеног котловског постројења, независно од концепције сагоревања примењене у његовом ложишту, дефинисан је алгоритам повезивања интегралних прорачуна котла и нумеричких прорачуна елемента чији се рад са посебном пажњом анализира. Развијен је поступак процене рада система као подлога за идентификацију промена које су настале применом нових шема подстехиометријског сагоревања, а тиме и утицајних параметара на процесе у таквом ложишту. На овакав начин могуће је вршити оцену квалитета рада постројења са аспекта ефикасности, ефикасности, сигурности и еколошки прихватљивог начина рада.

У трећем поглављу приказан је преглед нумеричких модела којима је описан зрачећи реактивни турбулентни двокомпонентни ток топлотног предајника у ложишту парног котла. Валидација овако формираног сложеног математичког модела путем научно верификоване методе коначних запремина, а за рад котла у конвенционалним условима сагоревања, извршена је поређењем са излазним вредностима нормативног једнодимензијског модификованог зоналног модела ложишта. Добијени резултати показују врло висок ниво корелације чиме је потврђена поузданост развијеног система уз могућност његове примене за процену рада ложишта и у новим, до сада прорачунски неиспитаним, подстехиометријским условима. На овакав начин спроведене су процедуре описа процеса, односно, прорачуна величина стања карактеристичних флуидних струја у две најчешће примењиване концепције са вишестепеним довођењем ваздуха по висини ложишта. Овако добијени резултати представљали су базу за допуну једнодимензијске методе која је развијена и потврђена само за стандардне шеме довођења секундарног ваздуха у ложиште.

У четвртном поглављу је представљен трећи корак испитивања рада ложишта са вишестепеним довођењем ваздуха по висини, а у циљу дефинисања једнодимензијских поступака предвиђања начина и брзине одвијања процеса у подстехиометријским условима. Дефинисане су количине и стања продуката сагоревања односно количине топлоте апсорбоване у зонама ложишта, чиме је одређен интензитет преношења енергије топлотном пријемнику на границама ложишта. Овако унапређена једнодимензијска метода прорачуна састоји се од интегрисаних билансних и карактеристичних једначина теорије преношења количине топлоте за све грејне површине котла. Уз поређење са температурским пољем прорачунског домена нумеричке симулације система повезаних рачунских процедура сложеног постројења дефинисана је, као излазна вредност истраживања, графичка зависност степена сагорелости горива по висини ложишта које ради у новим подстехиометријским условима. Оваквим коефицијентом једнозначно је дефинисана брзина отпуштања хемијске енергије горива. Како би проширена метода могла да се након допуне примењује за изворне концепције сагоревања, извршено је њено тестирање у том смислу. Показано је да, након подударња резултата са вредностима добијеним нормативним прорачунима, допуна зоналног модела није утицала на сужење области његове примене, него је погодна и за коришћење код савремених концепција сагоревања у енергетским парним котловима. Допуном методе и постизањем резултата који са високим степеном подударности описују промене настале у ложишту, односно стања струје носиоца енергије, могуће је поново успоставити директну везу са интегралним поступком процене рада осталих грејних површина котла постављених у конвективни гасни тракт. Овај тракт наструјавају продукти потпуно довршене реакције сагоревања и као такав није захтевао измене. Тако је поново успостављен интегрални прорачунски поступак који служи за анализу рада целокупног

постројења, а који има вишеструко мању процесорску захтевност и брзину достизања решења. Приказаним путем развијен је и кориснички програм за праћење рада енергетског парног котла блока 1 у ТЕ Костолац Б.

У петом поглављу спроведена је верификација на овај начин постављених модела. За овај део истраживања коришћена су погонска мерења из 2015. године, као резултат континуалног праћења рада блока 1 у ТЕ Костолац Б, на коме су уведене примарне мере редукције садржаја азотних оксида. У циљу потврде резултата примењеног поступка анализирани су и радни услови на блоку 2 који функционише у рачунски познатим, конвенционалним условима сагоревања. Провера могућности једнодимензијског модела за процену реалних стања топлотног пријемника приказана је графички, а представљени карактери промена токова топлотног пријемника су у потпуности задовољени. Модел је додатно потврђен могућностима процене количине убризгавања воде у хладњаке свеже и накнадно прегрејане паре, а у проширеном саставу који укључује нумеричку симулацију и са садржајем азотних оксида. Након потврде могућности модела да успешно предвиди карактер промена при раду сложеног енергетског система и у новим условима сагоревања у ложишту, извршена је параметарска анализа варирањем степена топлотне ефикасности екрана ложишта ( $\Psi$ ) и степена рецикулације хладних димних гасова ( $r_2$ ). У овом поглављу приказана је и кратка анализа промене радних параметара у функцији продукције енергетског парног котла (при оптерећењу од 70, 85, 100 и 110 % номиналне продукције паре) у обе концепције испитиваног подстехиометријског сагоревања. Праћен је и однос ослобођене и пренесене енергије у ложишту који се мења са променом концепције сагоревања и променом коефицијента вишка ваздуха у ложишту. На крају истраживања спроведена је и кратка параметарска анализа количине створених оксида азота као последњег у низу критеријума за оцену квалитета рада енергетског парног котла. Варијације садржаја азота у радној маси горива и његова расподела у волатилима и коксном остатку.

У завршном, шестом поглављу дисертације извршена је синтеза парцијалних закључака о резултатима истраживања у претходним поглављима дисертације. Изнети су детаљни закључци са критичком анализом остварених резултата истраживања. Истакнут је научни допринос дисертације као и могућност примене остварених резултата приликом решавања конкретних инжењерских проблема.

### 3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

#### 3.1. Савременост и оригиналност

Већина европских држава које троше значајне количине угља, заправо експлоатишу домаће ресурсе и у скорој будућности не планирају снижавање употребе овог енергента. У ову групу спада и Република Србија у којој око 90 % резерви фосилних горива чини угаљ, од чега је преко 80 % нискокалоричан лигнит. Угаљ учествује са око 65 % у домаћој производњи електричне енергије, а има га у довољним количинама према планираном нивоу потрошње, за експлоатацију и након 2050. године. Србија спада у ред држава које сопственим капацитетима у потпуности покривају потрошњу електричне енергије и као таква своју енергетску стабилност и у будућности већински ће заснивати на постројењима у којима се као примарна енергија користи угаљ. Стратегијом развоја до 2030. године планиране су ревитализације свих блокова веће снаге као и изградња нових термоенергетских постројења која ће морати, поред стандардних захтева за сигурним и ефикасним радом уз постизање жељеног ефекта снаге постројења, испуњавати и све строже еколошке стандарде који се у данашњем времену намећу обавезујућим регулативама.

Како поједине материје које настају процесом сагоревања фосилних горива имају негативан утицај на здравље човека и природу у целини, неопходно је у ту сврху додатно организовати и прилагодити процесе у енергетским парним котловима. Једну групу посебно неповољних материја које притом настају представљају оксиди азота -  $\text{NO}_x$ . Садржај  $\text{NO}_x$  у излазним димним гасовима термоенергетских постројења у Србији, при сагоревању лигнита, превазилази европску норму од  $200 \text{ mg/Nm}^3$ . Како је, при сагоревању лигнита, формирање највећег дела  $\text{NO}_x$  првенствено зависно од садржаја азота у гориву и локално доступног кисеоника у зонама где се врши сагоревање честице, неопходно је управљати процесима у парном котлу тако да се остваре и са овог аспекта повољни услови рада. За постизање еколошких стандарда у овом домену развијене су различите методе за смањење садржаја оксида азота у димним гасовима. У прву групу спадају примарне методе за редукцију азотних оксида које подразумевају превентивно деловање у циљу успоравања процеса формирања нежељених једињења. Овакве методе захтевају значајно мање инвестиционе трошкове, нарочито при модернизацији постојећих постројења и подразумевају такву организацију сагоревања у ложишту да се оно одвија у условима неповољног окружења за интензивно настајање азотних оксида. Иако мање делотворне од секундарних метода, које подразумевају третирање гасова након настајања штетних једињења додавањем одговарајућих реагенаса, примарни поступци постају незаобилазан вид организације рада ложишта енергетских парних котлова приликом сагоревања угљеног праха. Као најзначајнија погодност ових мера је што се њиховом применом постиже ефекат рада са мањом продукцијом  $\text{NO}_x$  без повећања експлоатационих трошкова. Код геолошки млађих угљева, у какве спадају домаћи лигнити, предвиђа се да је могуће приближити се или у потпуности задовољити норму у области жељеног нивоа емитовања  $\text{NO}_x$  само примарним поступцима. Како је у ложишту неопходно створити окружење које нема већу концентрацију кисеоника, односно водити процес тако да количина допремљеног кисеоника у зоне у којима се врши сагоревање буде приближна оној која се троши за реакцију оксидације, најпримењиванија мера ове групације је вишестепено довођење ваздуха по висини ложишта.

Постојеће интегралне прорачунске процедуре за процену рада парних котлова, развијене за пројектовање котлова, немају могућност праћења рада ложишта са вишестепеним довођењем ваздуха по висини ложишта. Конвенционалне концепције рада ложишта подразумевају довођење укупне количине ваздуха у зону горионика и она је увек емпиријски већа од стехиометријске количине неопходне за засићење реакције сагоревања. Уведена примарна мера вишестепеног дозирања ваздуха по висини ложишта подразумева сагоревање честица угљеног праха у подстехиометријском окружењу. Пошто се пред савремена енергетска постројења постављају и нови услови еколошки прихватљивог начина рада, неопходно је испитати промене које су настале увођењем оваквих, модерних шема сагоревања и дефинисати прорачунске процедуре којима се предвиђа рад постројења у новим погонским условима.

Тема која је истраживана у дисертацији је веома савремена и значајна с обзиром да нови енергетски котлови на лигнит функционишу са промењеним шемама довођења секундарног ваздуха у ложиште, а постојећа постројења се реконструишу у овом правцу у циљу постизања прописаних еколошких норми.

Кандидат је у својој дисертацији развио оригинални прорачунски систем који обухвата диференцијални математички модел процеса у ложишту и интегрални математички модел рада постројења са међусобним интеракцијама, а све у циљу процене рада енергетског парног котла у целини. Овакав систем омогућио је шири приказ свих релевантних стања струја које учествују у процесима енергетског парног котла на угљени прах. Потреба за оваквим начином истраживања проистекла је из чињенице да није могуће посматрати део

сложеног постројења а притом занемарити његово садејство са остатком система у коме он функционише, односно са којим чини целину. Развијени метод је применљив за инверзне проблеме процене радног стања код постојећих постројења, као и за директне проблеме, како модификације постојећих тако и развоја нових енергетских објеката. У склопу развоја прорачунског система дефинисан је математички модел сагоревања честица угљеног праха, струјања и зрачења продуката сагоревања, као и подмодел формирања и деструкције азотних оксида који у корелацији са интегралним термичким и аеродинамичким прорачунима омогућавају формирање свеобухватног описа погонског режима енергетског парног котла. Развој оваквог прорачунског модела је значајан ради поузданог предвиђања перформанси енергетских парних котлова. Квалитет рада самог котла који је могуће проценити применом развијеног система прорачуна може се поделити у групе ефективног, ефикасног, сигурног и еколошки прихватљивог рада. Оваква анализа нарочито је битна с обзиром да рад котла може имати пресудан утицај на расположивост и економичност целокупног енергетског система чија је он компонента.

Приликом истраживања обрађене су и дефинисане прорачунске процедуре, које су резултирале развојем једнодимензијске методе и одговарајућег корисничког софтвера за интегралну процену квалитета рада енергетског парног котла у новим условима функционисања ложишта са вишестепеним увођењем ваздуха. Применом овако конципираног алата могуће је вршити анализу рада парног котла преко низа погонских параметара у широким границама и кратком временском периоду. Верификација и валидација успостављених процедура је извршена поређењем са резултатима релевантних мерења за постојеће енергетске парне котлове у Србији. Резултати истраживања доприносе бољем разумевању процеса који се одвијају у енергетском парном котлу након увођења примарних мера за редукацију садржаја азотних оксида и омогућавају одређивање утицајних параметара на његов рад, са крајњим циљем повећања расположивости целокупног постројења.

### 3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Списак литературе која је коришћена приликом израде дисертације дат је у посебном одељку рада. 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 поступака моделирања процеса сложеног котловског постројења. У дисертацији је коришћено укупно 80 референци које су највећим делом савремени радови објављени у часописима.

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

Током реализације циљева истраживања коришћене су следеће методе и технике истраживања:

- метода систематизације и класификације захваљујући којој су, на основу прегледа литературе и анализе у њој приказаних резултата, утврђени правци истраживања у докторској дисертацији. Референтни извори имали су посебан значај приликом избора оптималне методе и модела за описивање процеса у ложишту енергетског

парног котла на угљени прах, моделирања утицаја остатка сложеног система на елемент који се са посебном пажњом анализира методом коначних запремина и валидације резултата истраживања у оквиру дисертације;

- интегралне методе процене рада грејних површина након ложишта по току продуката сагоревања, услед чега је потврђен систем прорачуна афирмисан у дисертацији;
- метода коначних запремина на основу које су одређени сви параметри неопходни за формирање једнодимензијског допуњеног модификованог зоналног модела ложишта. Овом методом је у садејству са интегралним процедурама рада осталих грејних површина проширен опис рада енергетског парног котла и са аспекта излазне концентрације азотних оксида;
- енергетска анализа рада парног котла која даје шири приказ стања свих струја које учествују у процесима и тиме омогућава оцену квалитета рада постројења у погледу ефективности, ефикасности, сигурности и еколошки прихватљивог начина рада;
- развој корисничког програмског пакета за праћење и оптимизацију рада енергетског парног котла чије ложиште функционише са вишестепеним довођењем ваздуха по његовој висини. Адекватном применом развијених метода дефинисан је ефикасан систем за оптимизацију рада комплексног енергетског постројења.

#### 3.4. Применљивост остварених резултата

Применом система повезивања прорачуна и допуњеног једнодимензијског модификованог зоналног модела развијеног у докторској дисертацији, могуће је већ у фази пројектовања одредити критичне области услед промене интензитета одвијања топлотног процеса при раду постројења и избећи појаву нежељених ефеката. Тиме се у значајној мери смањује ризик од појаве губитка топлотне снаге постројења и сигурности његовог рада. Резултати истраживања у оквиру докторске дисертације представљају допринос у области анализе топлотног процеса, односно баланса између брзине ослобађања и преношења енергије у ложиштима енергетских парних котлова са вишестепеним довођењем ваздуха по његовој висини. Овај допринос огледа се, пре свега у чињеници да у инжењерској пракси при овом начину организације сагоревања, а услед недовољног познавања промена које су при томе настале, не постоје једнодимензијске прорачунске процедуре које су при конвенционалним шемама довођења секундарног ваздуха имале вишестепенију употребу при пројектовању котлова. Допуњени поступак модификованог зоналног модела ложишта, у садејству са стандардним процедурама праћења рада осталих грејних површина, има значајну улогу у процесима реконструкције и модернизације ложишта енергетских парних котлова код којих се уводе примарне мере редукције азотних оксида. Кандидат је у склопу дисертације на једном конкретном примеру постројења комплексне конфигурације демонстрирао предности примене развијеног прорачунског система. С обзиром да су на приказаном случају постигнута значајна побољшања код модернизованог постројења у односу на иницијалну конфигурацију, развијени метод као и софтвер се могу успешно применити како код произвођача опреме тако и у области термотехнике и термоенергетике.

#### 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 научне и инжењерске проблеме, примењујући савремене методе теоријског и експерименталног 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

Ова дисертација несумњиво је проширила постојећа знања и представља научни допринос у области термотехнике и термоенергетике. Остварени научни допринос докторске дисертације „Моделирање процеса у енергетском парном котлу са вишестепеним довођењем ваздуха по висини ложишта“ огледа се у следећем:

- приликом истраживања коришћен је и потврђен конзервативни приступ у проучавању;
- развијене су методе праћења рада сложеног енергетског постројења синергијом интегралних и диференцијалних модела функционисања елемената система;
- постављена је и афирмисана једнодимензијска модификована зонална метода процене рада ложишта у новим условима сагоревања;
- дефинисане су нове зависности степена сагорелости угља по висини ложишта у подстехиометријским условима рада;
- развијеним поступком могуће је одредити оптималне димензије ложишта, место и количину ваздуха за догоревање;
- потврђено је да се довођењем секундарног ваздуха на више нивоа у ложиште контролишу процеси сагоревања и топлотног преноса енергије;
- доказано је да су нови услови подстехиометријског сагоревања праћени повећањем топлотних флуксева на границама ложишта;
- закључено је да већа апсорбована количина топлоте у ложишту није последица само ниже температуре продуката сагоревања на крају ложишта већ и редукованог садржаја кисеоника у зонама сагоревања;
- критичке анализе указују да пажљивим избором нивоа увођења и количине ваздуха за догоревање, систем вишестепеног довођења ваздуха по висини ложишта може представљати ефикаснији начин располагања енергијом горива у парном котлу;
- развијен је оригиналан кориснички компјутерски програм за праћење и оптимизацију рада енергетског парног котла са вишестепеним довођењем ваздуха у ложиште.

### 4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Приликом примене вишестепеног довођења секундарног ваздуха у ложишту су настале промене у интензитету ослобађања и топлотног преноса енергије у односу на конвенционалне шеме сагоревања које су се више деценија успешно примењивале али које по новим еколошким нормама не задовољавају потребни квалитет рада постројења. Током израде дисертације, развијен је оригиналан поступак спрезања процедура за детаљнији опис процеса који се одвијају у енергетском парном котлу, који омогућава да се при било којој шеми увођења секундарног ваздуха у ложиште са довољном тачношћу одреди ток температуре топлотног пријемника и предајника на границама свих грејних површина, обим убризгавања у хладњацима, ефикасност рада постројења, топлотна снага коју он при томе постиже и концентрација азотних оксида на његовом излазу.

У раду је наглашено да су поједине оцене квалитета рада енергетског парног котла често супротстављене, то јест, да ефикасан рад није нужно ефикасан и сигуран. У овом смислу достизање еколошке норме може изазвати промену општег нивоа квалитета рада

котловског постројења или значајније снижавање или повећавање једног од његових показатеља. Приступ потврђен у овој тези омогућава инжењерско усклађивање тренутних потреба и могућности у реалним радним условима.

На основу допуњеног једнодимензијског модификованог зоналног модела, дефинисани су интензитети процеса ослобађања и преноса енергије горива у новим условима подстехиометријског сагоревања. Осим тога, допуњена метода је испитана и не ремети процену рада при стандардним шемама сагоревања. Приказано је да овако проширена метода може да се користи и независно од нивоа увођења ваздуха за догоревање. Проширеном облашћу примене сачувано је акумулисано искуство у пројектовању и праћењу рада елемената котловских постројења.

Како се при новим концепцијама сагоревања ваздух контролисано доводи у ложиште, у складу са брзином трошења кисеоника, реакцију је могуће потпуно завршити са укупно мањом количином ваздуха. Мање ваздуха у ложишним процесима задржава општи ниво стања топлотног предајника кроз гасни тракт одакле следи да ће овакав процес увек бити ефикаснији. Функционисање целокупног система које се остварује са мањим протоком секундарног ваздуха имаће и мање експлоатационе трошкове при његовом транспорту.

Резултати остварени током израде дисертације представљају драгоцену подлогу при пројектовању, ревитализацији и вођењу савремених парних котлова у чију концепцију рада је увршћено вишестепено довођење ваздуха по висини ложишта.

У дисертацији је развијен поступак који омогућава вишепараметарску оптимизацију рада енергетског парног котла који је једноставан, брз и поуздан у идентификовању оптималне комбинације утицајних параметара. У односу на приступе који су до сада публиковани у отвореној литератури, развијенији метод описује рад система у целини и погодан је за инжењерску примену.

#### 4.3. Верификација научних доприноса

Део доприноса докторске дисертације верификован је радом који је кандидат публиковао у међународном часопису који је на SCI листи и радом саопштеним на скупу од међународног значаја, као и техничким решењем у виду оригиналног корисничког програма:

##### Категорија M21

1. G. Stupar, D. Tucaković, T. Živanović, S. Belošević, *Assessing the impact of primary measures for NO<sub>x</sub> reduction on the thermal power plant steam boiler*, Applied Thermal Engineering, Vol. 78, p. 397-409, 2015, IF(2014)=2.624, ISSN 1359-4311

##### Категорија M33

2. G. Stupar, D. Tucaković, T. Živanović, M. Banjac, S. Belošević, N. Crnomarković, *Calculation of thermal power plant steam boiler for analysis facility work after implementation of primary measures for NO<sub>x</sub> reduction*, CD-ROM Proceedings, ISBN: 978-86-7877-024-1, International Conference Power Plants 2014, Zlatibor, Serbia, October, 2014, E2014-161.

##### Техничка решења – нови софтвер M85

3. Г. Ступар, Д. Туцаковић, Т. Живановић, *Кориснички софтвер за термички прорачун енергетског парног котла блока 1 у ТЕ Костолац Б у циљу провере температурских услова рада грејних површина након уведених примарних мера за редукацију садржаја азотних оксида*, нови софтвер, карактер техничког решења: математички модел, нумерички алгоритам и компјутерски програм, корисник: ЈП „Електропривреда Србије“ на основу пројекта Министарства за науку и технолошки развој број 33018 (примена за симулацију и предвиђање погонских ситуација парног котла блока ТЕ Костолац Б-1 након

имплементације вишестепеног довођења секундарног ваздуха по висини ложишта), решење је реализовано: 2015. године.

## 5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

На основу прегледа и детаљне анализе докторске дисертације под називом **„Моделирање процеса у енергетском парном котлу са вишестепеним довођењем ваздуха по висини ложишта“** кандидата Горана М. Ступара, дипл. инж. маш., студента докторских студија, Комисија за 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 Универзитета 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 Горан М. Ступар, дипл. инж. маш., студент докторских студија, успешно завршио докторску дисертацију у складу са предвиђеним предметом и постављеним циљевима истраживања. Кандидат је остварио оригиналне резултате из области везаних за процесе у енергетским парним котловима на угаљ, користећи при том расположиву литературу и резултате експерименталног истраживања. Резултати истраживања су систематично обрађени и на основу њих изведени закључци о правцима промена које настају при ослобађању и преносу енергије горива у ложиштима котлова са вишестепеним довођењем ваздуха по висини, који су већ примењени за решавање конкретних инжењерских проблема. Научна и стручна јавност је упозната са резултатима истраживања публикавањем рада у врхунском међународном часопису (категиорија М21), рада саопштеног на скупу од међународног значаја штампаног у целини (категиорија М33), као и реализацијом техничког решења новог корисничког компјутерског програма.

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 у енергетском парном котлу са вишестепеним довођењем ваздуха по висини ложишта“** кандидата Горана М. Ступара, дипл. инж. маш., студента докторских студија, стави на увид јавности.

У Београду, 10.03.2016. године

### ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

проф. др Драган Туцаковић  
Универзитет у Београду – Машински факултет

проф. др Титослав Живановић  
Универзитет у Београду – Машински факултет

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