

**Иван Д. Томановић<sup>1\*</sup>, Срђан В. Белошевић<sup>1</sup>, Мирослав А. Сијерчић<sup>1</sup>,  
Владимир Б. Бељански<sup>1</sup>, Драѓан Р. Туцаковић<sup>2</sup>,  
Тийослав В. Живановић<sup>2</sup>, Стиван Ђ. Немода<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Институт за нуклеарне науке „Винча”, Универзитет у Београду, Београд, Србија

<sup>2</sup> Машински факултет, Универзитет у Београду, Београд, Србија

## **Нумеричка оптимизација процеса у ложишту са аспеката емисије NO<sub>x</sub> и ефикасности енергетског котла**

Научни рад

*Развијен је математички модел, намењен за предвиђање процеса у енергетским парним котловима ТЕ Косиловац Б индустријално ложиштем са оптимизацијом. Модел је примењен за нумеричку анализу рада котла ради смањења емисије NO<sub>x</sub> уз истовремено одржавање високог степена корисности котла. Комплексни двофазни блок час-часовне моделиран је Ојлер-Лагранжевим приступом. Повезивање фаза је осигурено кувлањем помоћу PSI-Cell концепта. Ради осигуравања жељених анализа, уграђен је под-модел формирања/деструкције NO, унутар сложеног кода за сагоревање, који се користи за предвиђање емисије на излазу из ложишта. Моделирани су термички и гориви NO, као најзначајнији оксиди азота при сагоревању угљеног праха. Прорачунски програм је развијен ради лакше употребе од стране инжењерског особља приликом анализа процеса у котловским постројењима. Нумеричке симулације су извршене за различите радне услове котла, приликом ложења лигнином са кога Дрмно. Сувојствено заштити за смањење емисије и ефикасним сагоревањем, са освртом на безбедан рад прегрејача паре често заштитевају рад котла у уским границама радних параметара, који су утврђени помоћу термичког прорачуна котла.*

Кључне речи: *математички модел, термички прорачун, ложиште котла, угљени прах, емисија NO<sub>x</sub>*

### **Увод**

Све строжији захтеви у области енергетских система, који се односе на енергетску ефикасност и задовољавање еколошких стандарда и прописа, захтевају додатна истраживања и унапређења постојећих постројења, као и примену до сада развијених решења при изградњи нових постројења. Основни циљеви унапређења су повећање ефикасности процеса трансформације енергије и могућност употребе

\* Одговорни аутор; електронска адреса: ivan.tomanovic@vin.bg.ac.rs

горива са ширим опсегом карактеристика, уз истовремено побољшање еколошке ефикасности постројења. Усавршавање процеса сагоревања не захтева значајне инвестиционе трошкове и изводиво је са већ постојећом опремом на постројењу. Добре смернице за побољшање процеса сагоревања могуће је добити комбиновањем термотехничких испитивања процеса на котлу и резултата нумеричких симулација. Овакав приступ је широко распрострањен у свету при решавању проблема и побољшању рада енергетских постројења [1–23].

Сагоревање угљеног праха зависи од великог броја променљивих параметара, услед чега је процес тешко држати под контролом. У току рада котла често није могуће остварити предвиђене перформансе услед утицаја и међусобне спрегнутости многобројних радних параметара који одређују погонско стање ложишта, а самим тим и целокупног блока. Ложиште из тог разлога представља критичан елемент целокупног термоенергетског система и потребно га је детаљно испитати и развити ефикасан и поуздан метод предвиђања и контроле процеса.

С обзиром на сложеност процеса сагоревања емпиријске методе и глобални показатељи често не могу самостално указати на узроке одступања појединих параметара при раду котла. Експерименталним мерењима на ложишту котла могуће је дијагностиковати стање и утврдити одступање појединих параметара, али често не дају довољно података за анализу организације процеса сагоревања. Осим тога процес мерења је скуп и мукотрпан, и не обезбеђује довољну заштиту од погрешно измерених појединих локалних параметара процеса. Такође, предвиђање понашања система помоћу пројекције резултата појединих мерења на ситуације са измењеним радним условима није увек довољно поуздано, што додатно отежава анализе засноване само на мерењима.

Нумеричким методама се могу утврдити зависности погонских параметара у различитим условима рада ложишта, који су само за одређен број случајева потврђени експериментом. Као посебна дисциплина истраживања, ефикасна су допуна мерењима, јер пружају специфичну контролу уз могућност корекције експерименталних истраживања. Главна предност модела је детаљан увид у одвијање сложених процеса [24], попут сагоревања и турбуленције, које су тешко мерљиве у условима који владају унутар ложишта котла. Развојем и унапређењем рачунара време за које се долази до резултата је значајно смањено, а цена прорачуна доведена на веома прихватљиву вредност, па је могуће извршити велики број симулација које могу помоћи у анализама радних параметара.

Посебна пажња приликом развоја софтвера посвећена је моделирању процеса формирања и деструкције оксида азота и предвиђања емисије  $\text{NO}_x$ . За решавање ових проблема постоји већи број могућих приступа, који се могу пронаћи у радовима [5–11, 13–15, 25, 26], а којима је заједничко то да се као најзаступљенији оксид азота моделира  $\text{NO}$ , док је удео осталих занемарљив и узима се у обзир додавањем њиховог биланса у модел  $\text{NO}$ .

Софтвер је развијен за усвојено ложиште блока ТЕ Костолац Б1 снаге 350 MWe [16, 19]. Развијени и верификовани комплексни 3-Д модел приказао је могућности које одговарају савременим трендовима и потребама, и по особинама одговара модерним софтверским решењима [5, 6, 15]. Програм омогућава квалитативну и квантитативну анализу комплексних процеса који се одвијају у ложишту. За потребе анализе еколошких утицаја развијен је и уграђен, унапређени потпрограм за одређивање емисије  $\text{NO}_x$  на излазу из ложишта [18].

Један од главних циљева развоја софтвера био је испитивање могућности примене примарних метода смањења емисије  $\text{NO}_x$ , које могу донети значајну уштеду при експлоатацији постројења, јер имају мале почетне инвестиционе трошкове, а у комбинацији са секундарним методама снижавају њихову цену, због мање потрошње енергије и реагенса који се у секундарним методама користе.

Развијени нумерички код и софтвер примењиви су за симулацију реалних радних услова и намењени су првенствено инжењерском кадру који се бави анализом и оптимизацијом процеса у ложиштима енергетских котлова. Унапређени модел емисије  $\text{NO}_x$  може се користити приликом оптимизације примарних мера редукције емисије штетних једињења азота, које се заснивају на погодној организацији процеса сагоревања у ложишту. Модел и припадајући алгоритам омогућавају анализе различитих појава и проблема везаних за процесе у ложиштима котлова на спрашени угаљ. Због међусобне повезаности и узајамне зависности поједини аспекти проблема не могу се разматрати изоловано већ само у склопу комплексног процеса. У овом раду је то показано на примеру анализе емисије азотних оксида при сагоревању угљеног праха.

#### Математички модел процеса у ложишту за сагоревање угљеног праха, са подмоделом $\text{NO}_x$

Симулација процеса који се одвијају у ложиштима котлова на угљени прах је веома тешка и сложена, с обзиром на међусобно спрегнуте утицаје појединих феномена [27]. Као основа за развој рачунарског програма усвојен је модел заснован на математичком опису феномена размене количине кретања, топлоте и масе двофазног турбулентног струјања са хемијским реакцијама и разменом топлоте зрачењем у реалној тродимензионалној геометрији. Модел обухвата тродимензионални елиптични ток. Вишекомпонентна континуална фаза описана је у Ојлеровом пољу. Транспортни феномени у процесу су описани статистички осредњеним диференцијалним једначинама конзервације флукутирајућих компоненти. Систем једначина је затворен  $k$ - $\epsilon$  моделом турбуленције. При томе се за купловање гасне и дисперзне фазе користи PSI-CELL концепт. Сама чврста фаза је описана обичним диференцијалним једначинама кретања, енергије и промене масе индивидуалних честица у Лагранжевом пољу [16, 27, 28]. Размена топлоте радијацијом је описана моделом „шест флуксава“ [16, 19, 27, 29]. Хетерогена реакција конверзије угља је разматрана у кинетичко-дифузионој области. Моделиране једначине гасне фазе имају за све променљиве исти генерални облик:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j \Phi) - \frac{\partial}{\partial x_j} \Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x_j} = S_\Phi - S_p^\Phi \quad (1)$$

Унутар једначине (1)  $\Phi$  означава ( $U, V, W, P, k, \epsilon, T, X_{\text{O}_2}, X_{\text{N}_2}, X_{\text{CO}_2}, X_{\text{H}_2\text{O}}, X_{\text{HCN}}, X_{\text{NO}}, F_x, F_y, F_z, N_p$ ). Решава се систем симултално повезаних једначина [27, 30], који се састоји од: једначина одржања компонената брзине у правцима координатних оса ( $U, V, W$ ) повезаних једначинам притиска ( $P$ ), транспортне једначине турбулентне кинетичке енергије ( $k$ ), једначине дисипације турбулентне кинетичке енергије ( $\epsilon$ ),

једначине одржања енталпије смеше ( $T$ ), једначина концентрација гасних компоненти ( $X_{O_2}, X_{N_2}, X_{CO_2}, X_{H_2O}, X_{HCN}, X_{NO}$ ), једначина компонената флуksа зрачења ( $F_x, F_y, F_z$ ) и једначине концентрације честица дисперзне фазе ( $N_p$ ). Кретање честица унутар ложишта описано је моделом дисперзне фазе у Лагранжевом пољу. Свака честица се прати и приписују јој се три компоненте брзине ( $U_p, V_p, W_p$ ), температура ( $T_p$ ), маса ( $m_p$ ), пречник честице ( $d_p$ ) и други потребни подаци. Интеракција између фаза – хетерогене хемијске реакције честица угља, разматра се у кинетичко-дифузионом режиму и описује се преко додатних извора – модела количине кретања, топлоте и масе међу фазама ( $S_m, Q_{con}, Q_{rad}, Q_{mass}, \dots$ ), преко којих честице утичу на гасну фазу. Утицај гасне фазе на честице се одређује на основу локалних вредност термодинамичких и транспортних својстава гасне фазе ( $\rho, C_p, \mu_{eff}, \lambda, \dots$ ). Детаљан опис математичког модела може се наћи у [16, 19].

Дискретизовани домен је подељен на контролне запремине, за које се постављају транспортне једначине променљивих [30]. За повезивање једначина количине кретања користи се једначина притиска, применом SIMPLE методе. Дискретизација парцијалних диференцијалних једначина изводи се тзв. хибридном шемом [30]. За решавање система алгебарских једначина добијених дискретизацијом употребљава се SIPSOL solver, као варијанта Stone-овог алгоритма [31].

Применом наведеног модела ложишних процеса могуће је одредити поље турбулентног струјања – компоненте средње брзине и турбулентне карактеристике, температурно поље медија у ложишти, поље концентрација компоненти димног гаса, расподелу компонената радијационог топлотног флуksа, као и податке који дефинишу кретање и сагоревање честица угљеног праха.

У оквиру укупног модела транспорта количине кретања, топлоте и масе интегрисан је модел формирања и деструкције  $NO_x$  заснован на поједностављеној хемијској кинетици [18, 32]. Моделирање конзервације  $NO_x$  је аналогно моделирању концентрација осталих хемијских супстанција учествујућих у процесу, с том разликом што је његов утицај на остале компоненте због ниске концентрације занемарљив. С обзиром да је  $NO$  главни оксид азота у ложиштима на спрашени угаљ и да чини око 90% укупне количине формираног оксида азота, само се његово формирање и деструкција моделира. Постоје три основна механизма формирања  $NO$  у процесу сагоревања, која доводе до његовог настанка: термички, гориви и промттни, с тим да се промттни занемарује с обзиром на веома мали допринос формирању. Термички  $NO$  може имати удео 5–25% у укупној количини  $NO_x$ , и има изражену зависност од локалне температуре. Постаје значајан тек за температуре у пламену веће од 1650 K (често тек 1800 K). Гориви  $NO$  је најутицајнији и његов удео се креће између 75–95% у укупној количини  $NO_x$ . Првенствено зависи од садржаја азота у гориву и односа горива и ваздуха, док температура има мањи утицај. Азот из горива се ослобађа деволатилизацијом у форми интермедијана попут  $HCN$  или  $NH_3$  који реагују у гасној фази.

Термички  $NO$  је моделиран употребом поједностављеног механизма Zeldovich-a [25] за укупну брзину формирања и деструкције, док се за гориви  $NO$  користи механизам хемијске кинетике према De Soete-u [32, 25], који узима у обзир и утицај локалне концентрације  $O_2$ . De Soete-ов механизам је додатно коригован према препоруци Lockwood-a и Romo Millares-a [24] за услове са релативно ниском концентрацијом горива која преовлађује код ложишта са сагоревањем угљеног праха.

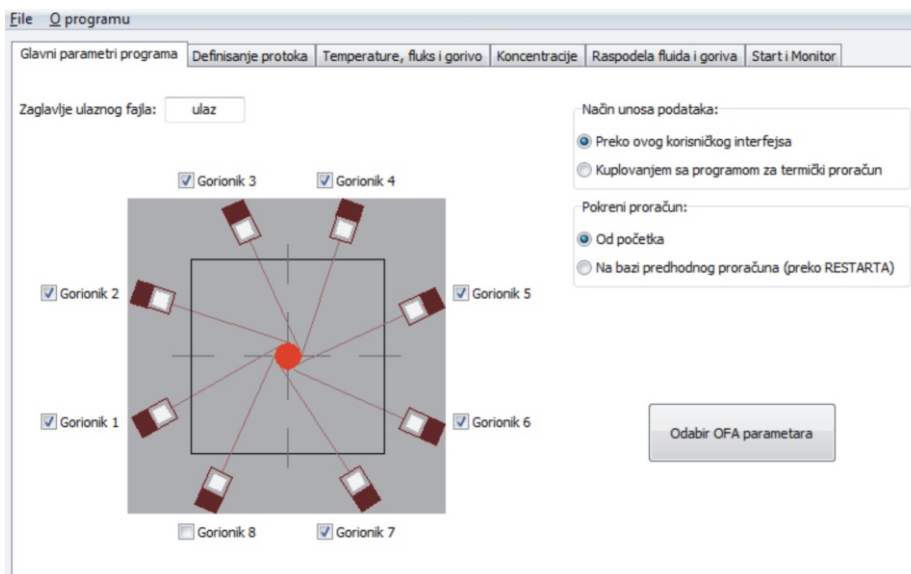
### Софтвер за симулацију ложишних процеса и предвиђање емисије $\text{NO}_x$

На основу модела ложишних процеса, са инкорпорираним подмоделом  $\text{NO}_x$ , развијен је софтвер, са посебним корисничким интерфејсом ради једноставнијег и поузданијег уноса свих података и параметара потребних за прорачун.

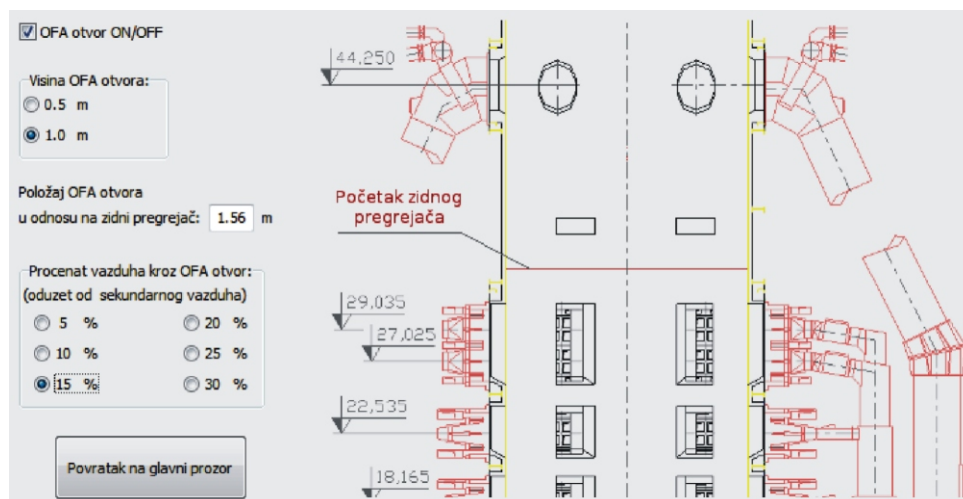
На почетном панелу програма приказаном на сл. 1 могуће је одабрати начин уноса података – преко корисничких маски унутар софтвера, или купловањем са програмом за прорачун припреме угљеног праха, као и одабир покретања прорачуна од почетка или наставка над претходно добијеним пољем (записаном у рестарт датотекама). Поред шематског приказа ложишта налазе се поља за одабир горионика у раду.

Са главног панела приказаног на сл. 1 прелази се на панеле за дефинисање протока, температура, граничних услова на зиду (могућ гранични услов према температури, топлотном флуксу или непознат – усваја се), састава горива, степена запрљаности екрана, концентрација појединих једињења у аеросмешу, расподеле отпарака, ваздуха и горива по етажама горионика. На панелима се све вредности могу задати за појединачне горионике. Горионички пакети су означени бројевима 1–8. Ознаке у програму одговарају стварним ознакама горионика на постројењу што олакшава сналажење приликом уноса података. При покретању програма у пољима за унос података су вредности унесене претходним прорачуном тако да треба променити само податке који се разликују у односу на претходне.

На почетном панелу се такође налази дугме којим се отвара панел за одабир Overfire Air (OFA) параметара. Преко панела приказаног на сл. 2. корисник одабира параметре за модификацију ложишта увођењем OFA отвора изнад горионичких пакета. Потребни параметри су димензије отвора и положај изнад горионика, као и проток ваздуха кроз отворе. Додатак је осмишљен у циљу провере утицаја положаја OFA отвора на редукацију  $\text{NO}_x$  и одабир оптималних положаја.



Слика 1. Главни кориснички панел за унос података



Слика 2. Одабир параметара за симулацију ложишта са OFA отворима

### Верификација нумеричког кода и валидација прорачуна

Прва провера софтвера било је испитивање утицаја мреже у оквиру верификације нумеричког кода, након чега је извршено поређење резултата прорачуна са вредностима добијеним мерењем и анализама, односно валидација прорачуна, детаљно описана у [16, 18]. Анализа нумеричке грешке заједно са побољшањем мреже приказала је добро слагање и задовољавајуће резултате, када се узму у обзир одступања и грешке мерења. За извођење симулација усвојена је 3-Д структурирана нумеричка мрежа са  $130 \times 65 \times 65 = 549250$  контролних запремина, као и 200 нумерички праћених трајекторија честица по етажи горионика, односно 800 по горионику, тј. укупно 5700 када ради 7 горионика. На основу ситовне анализе, Rosin-Rammler-Sperling расподеле и сета нумеричких експеримената, усвојен је репрезентативни средњи пречник монодисперзног угљеног праха од  $150 \mu\text{m}$ .

Наредни корак представљао је валидацију нумеричких прорачуна и математичког модела, изведену поређењем емисије  $\text{NO}_x$  из котла и средње температуре гаса на излазу из ложишта са резултатима мерења добијених за претходне године, за различита горива и режиме рада. У свим анализираним случајевима приликом симулације расподела горива и ваздуха по етажама горионика, као и горионици у раду су одговарали стварном стању на котлу у погонској ситуацији. Састав горива приликом симулације је исти као састав стварног горива коришћеног у погонској ситуацији. Резултати нумеричке симулације за температуре и емисије показали су добро слагање при поређењу са мерењима, са минималним одступањима [18].

Прорачунате вредности емисије у већини случајева прелазе граничну вредност емисије од  $450 \text{ mg/Nm}^3$ , прописану Правилником о граничним вредностима емисије, начину и роковима мерења и евидентирања података ("Сл. гласник РС", бр. 30/97 и 35/97), односно вредност од  $500 \text{ mg/Nm}^3$  прописану Директивом 2010/75/EU

Европске уније – ограничење емисије штетних материја у ваздух из великих ложишта, која такође предвиђа смањење емисије на 200 mg/Nm<sup>3</sup> почевши од 2016. године.

### Симулације сагоревања спрашеног угља и формирања/деструкције NO<sub>x</sub> у котловском ложишту

Симулације су обухватиле погонске случајеве са употребом горива чији састав одступа од гарантог, али одговара реалним погонским условима. Овде су приказани резултати неколико карактеристичних погонских ситуација симулираних са два горива различита од гарантног, која су коришћена у процесу сагоревања на котловима ТЕ Костолац Б1 и Б2. Састав горива коришћених у симулацијама приказан је у таб. 1.

У таб. 2 су приказани карактеристични параметри разматраних тест-случајева. Тест-случајеви означени су ознаком која одговара доњој топлотној моћи радног горива за које је урађена симулација.

**Табела 1. Састав горива коришћених приликом симулација**

Погонско гориво	Техничка анализа							H <sub>d</sub> [kJ/kg]
	Елементарна анализа							
	W <sup>r</sup> [%]	A <sup>r</sup> [%]	C <sup>r</sup> [%]	H <sup>r</sup> [%]	O <sup>r</sup> [%]	N <sup>r</sup> [%]	S <sup>r</sup> <sub>sag</sub> [%]	
8463	41,91	20,17	25,08	2,32	8,96	1,00	0,56	8463,0
8226	41,13	21,64	24,39	2,32	8,96	1,00	0,56	8226,0

8463: W<sub>p</sub> = 9,407%, 8226: W<sub>p</sub> = 9,249%

**Табела 2. Расподела угљеног праха и ваздуха по етажама горионика и добијене излазне температуре и емисије NO<sub>x</sub>**

Тест–случај	Расподела горива по етажама горионика				Удео протока отпарака кроз GG [%]	Удео протока секундарног ваздуха (са језгреним) кроз GG [%]	t <sub>изл</sub> [°C]	Емисија NO <sub>x</sub> [mgNm <sup>-3</sup> ]
	Главни горионици (GG)		Бридови горионици (BG)					
	Доњи	Горњи	Доњи	Горњи				
8463–1*	39,0	21,0	26,0	14,0	58,0	64,85	1048	535,2
8463–3	39,0	21,0	26,0	14,0	59,0	50,00	1036	531,2
8463–4	39,0	21,0	26,0	14,0	59,0	70,00	1051	568,1
8226–1**	45,5	24,5	19,5	10,5	57,0	64,83	990	468,2
8226–2	45,5	24,5	19,5	10,5	57,7	65,14	1050	504,0
8226–3	45,5	24,5	19,5	10,5	57,7	50,00	1040	461,0
8226–4	45,5	24,5	19,5	10,5	57,7	70,00	1036	564,3

\* Седам горионика ради неравномерно; \*\* Седам горионика у раду, у осталим случајевима 6

Више симулација је изведено са оба горива у циљу утврђивање утицаја промене протока секундарног ваздуха на процесе формирања и деструкције  $\text{NO}_x$  који напушта ложиште. Утицај промене протока секундарног ваздуха, за радно гориво 8463 (таб. 1.) испитан је у тест-случајевима 8463–1, 3 и 4. Овде су протоци отпарака, терцијарног и присисаног ваздуха у сва три случаја једнаки и износе редом 308,28 kg/s, 10,4 kg/s и 71,68 kg/s. Протоци секундарног и језгреног ваздуха су у свим случајевима варирани. Они у појединачним случајевима 8463–1, 3 и 4 износе редом (заједно са језгреним ваздухом) 209,06 kg/s (6 горионика у раду), 212,71 kg/s (7 горионика у раду) и 219,16 kg/s (7 горионика у раду). Укупан проток горива може се видети у таб. 3, и овај проток се распоређује на горионике у раду.

У тест случајевима 8226–1 до 8226–4 примењено је радно гориво са ознаком 8226 чији се састав може видети у таб. 1. У случају 8226–1 укупан проток отпарака износи 306,25 kg/s, док је у осталим случајевима он 252,48 kg/s што је задато ради испитивања побољшане заптивености котла. У свим случајевима, осим 8226–1, 6 горионика је у раду. У првом случају протоци секундарног, језгреног, терцијарног и присисаног ваздуха износе 182,63 kg/s, 37,46 kg/s, 10,64 kg/s и 73,06 kg/s, док су у осталим случајевима 222,33 kg/s, 44,41 kg/s, 12,30 kg/s и 35,95 kg/s.

Прва група података добијених симулацијама приказује резултате за гориво 8463. Након варирања протока секундарног ваздуха кроз главне горионике можемо приметити негативан утицај пораста количине секундарног ваздуха на емисију штетних једињења. Разлог томе је што виша температура димних гасова утиче на механизме формирања  $\text{NO}_x$  услед чега је предвиђена емисија значајно повећана.

Добијене температуре и емисије приказане су на дијаграму на сл. 3, одакле се уочава да приликом убацивања велике количине ваздуха кроз главне горионике, услед пораста локалног коефицијента вишка ваздуха у тој области долази до пораста температуре пламена, што се одражава на излазну температуру димних гасова која се мења од 1036 °C до 1051°C. Осим тога вишак ваздуха у зони сагоревања, заједно са повишеном температуром утиче на убрзано формирање оксида азота, услед чега

**Табела 3. Приказ термичког прорачуна котла за одабране симулиране тест случајеве**

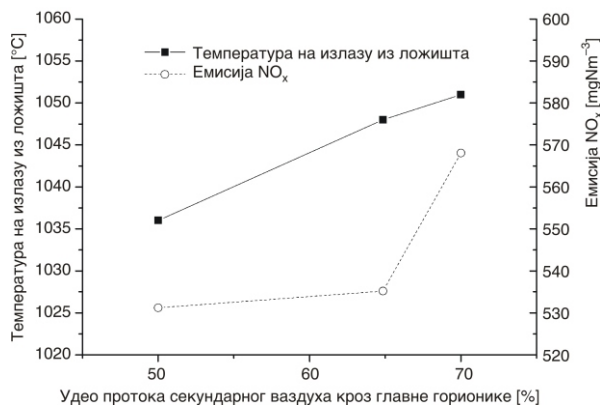
НАЗИВ	8463-1	8463-3	8463-4	8226-1	8226-2	8226-3	8226-4
Темп. дим. гасова на изл. из ложишта $t_{izl} = t_1'$ [°C]	1048	1036	1051	990	1050	1040	1036
Убризг. воде у л. св. паре, $D_{Hs} = D_{H1} + D_{H2}$ [kgs <sup>-1</sup> ]	18,439	15,299	19,281	0	19,501	17,887	15,599
Темп. свеже прег. паре, $t_s$ [°C]	540	540	540	534	540	540	540
Убризг. воде у л. накнадно прег. паре, $D_{Hr}$ [kgs <sup>-1</sup> ]	6,613	5,281	6,853	0,771	6,227	5,798	4,699
Темп. накн. прег. паре, $t_{rs}$ [°C]	540	540	540	540	540	540	540
Потрошња горива, $B$ [kgs <sup>-1</sup> ]	103,18	102,71	103,27	103,78	105,25	106,26	104,71
Темп. изл. гасова, $t_{iz}$ [°C]	171	170	171	169	160	171	159
Губ. у изл. гасовима, $q_2$ [%]	11,13	11,09	11,13	11,11	10,4	11,25	10,35
Степ. кор. котла, $\eta_k$ [%]	85,79	85,83	85,78	85,77	86,49	85,63	86,53



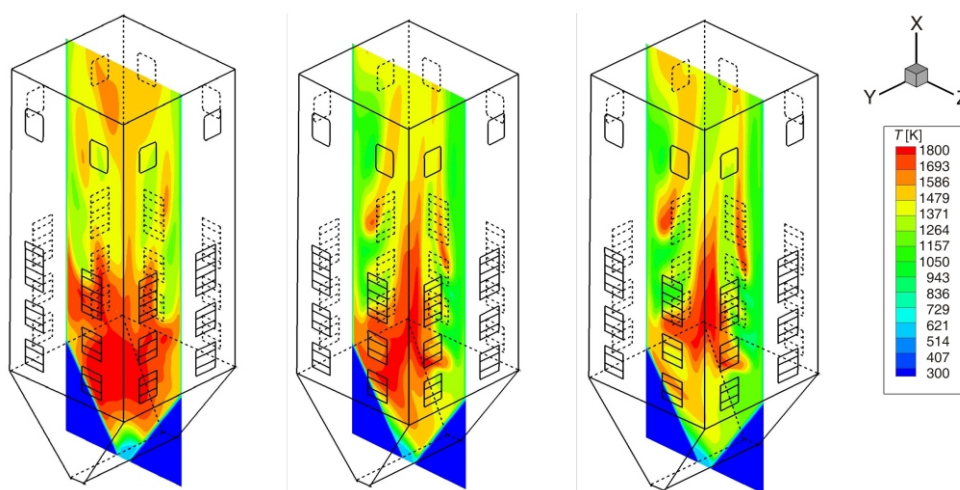
имамо приметан интензиван пораст емисије при порасту протока секундарног ваздуха кроз главне горионике од 65% до 70%. С друге стране, више ваздуха кроз горионике бридове (отпарке) утиче на смањење емисије, јер се, слично као код примене ОФА отвора, сагоревање делимично одлаже до виших зона, па се одиграва у области нешто нижих температура. Анализа указује на значај контроле локалног вишка ваздуха у ложишту.

Слика 4 приказује температурно поље унутар ложишта за три приказана случаја, на основу којег се може уочити облик и положај пламена. Потребно је напоменути да је у случају 8463–1 узет идентичан распоред протока угљеног праха и ваздуха као и у случају када су обављана мерења на котлу за дато гориво. Такође у случају 8463–1 у раду се налази 7 горионика, као што је био случај приликом мерења, док је у друга два случаја у раду 6 горионика.

Преостале четири симулације приказане у таб. 2, обављене су за радно гориво са ознаком 8226. У њима су испитиване заптивености котла и њихов утицај на излазне параметре. У тест случају 8226–1 котло је незаптивен и при томе је присис фалш ваздуха 73,060 kg/s, што је 13,4% у односу на номиналну потрошњу ваздуха. Тест



Слика 3. Утицај протока секундарног ваздуха кроз главне горионике на температуру и емисију NO<sub>x</sub> на излазу из посматраног ложишта, за тест-случај 8463

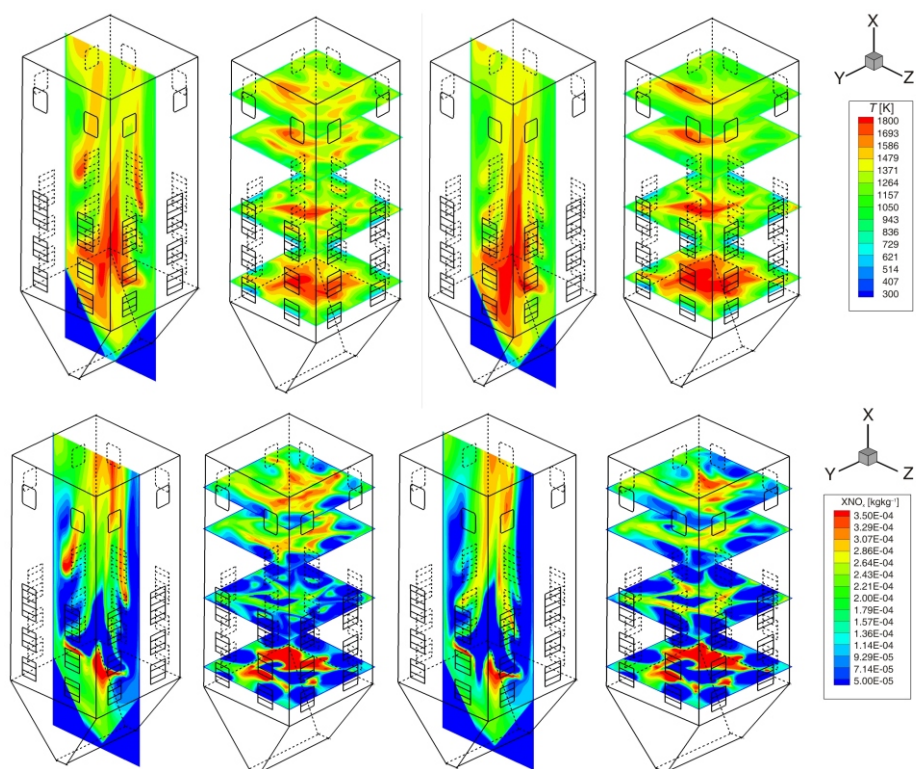


Слика 4. Приказ температурног поља унутар ложишта котла за тест-случајеве 8463–1, 3 и 4, респективно,  $T = 1048, 1036$  односно  $1051$  °C,  $NO_x = 535,2, 531,2$  односно  $568,1$  mg/Nm<sup>3</sup>

случајеви 8226–2, 3 и 4 имају побољшану заптивеност и при томе је присис фалш ваздуха сведен на 35,948 kg/s, а међусобно се разликују по варираном протоку секундарног ваздуха.

Побољшање заптивености је значајно утицало на пораст излазне температуре на крају ложишта, а у исто време умањен је интензитет формирања  $\text{NO}_x$ , тако да у погонским ситуацијама 8226–1 и 8226–3 имамо сличну емисију, а при томе је у 8226–3 излазна температура за око 40 степени виша. Ово указује на битан утицај неконтролисаног присиса ваздуха у ложиште на емисију штетних гасова и приказана могућност оптимизације процеса ради његовог спречавања и побољшања свеукупне енергетске и еколошке ефикасности котла. Највероватнији узрок тога је што присис штетног ваздуха повећава концентрацију кисеоника у ложишту што убрзава механизме формирања  $\text{NO}_x$ , и самим тим повећава његову количину у ложишту.

Такође је за ово гориво извршено поређење утицаја расподеле горива по висини ложишта и броја горионика у раду. Слика 5 приказује упоредно температуре пламена за случај 8226-мерено, који је коришћен и при верификацији модела, и 8226–1 код кога је нешто већи проток горива кроз главне горионике, док је расподела секундарног ваздуха остала непромењена. Уочљиво је спуштање пламена ка левку ложишта и смањење температуре на излазу. Утицај расподеле горива по висини



Слика 5. Утицај расподеле горива по висини ложишта и броја горионика у раду на положај пламена и емисију – поређење 8226-мерено и симулирани тест случај 8226–1,  $T = 1039$  односно  $990$  °C,  $\text{NO}_x = 557,8$  односно  $468,2$  mg/Nm<sup>3</sup>

горионика је у сагласности са нумеричким испитивањима у случају коришћења гарантног горива и у односу на номинални, пројектни радни режим котла [17, 18]. Са становишта емисије, уношење већег удела горива кроз главне горионике остварило је значајну редукацију  $\text{NO}_x$ , али је у овом конкретном случају температура на излазу сувише ниска да би био примењив као радни режим на котлу. Ово указује на неопходност да се нумеричке симулације процеса изведу за сваку конкретну погонску ситуацију и да је при уопштавању закључака увек потребно бити опрезан.

### Утицај примарних мера за редукацију $\text{NO}_x$ на рад котла

Након завршених симулација процеса у ложишту изведен је комплетан термички прорачун котла, којим је утврђен утицај погонских ситуација на ефикасност и сигурност рада котла и проверени су параметри произведене паре за симулиране погонске ситуације, а такође је проверен и утицај на степен корисности котла.

У таб. 3. су приказани резултати термичког прорачуна за симулиране тест-случајеве. Приметно је да није могуће у свим случајевима обезбедити добре параметре прегрејане паре. Испитивани случај 8226–1 не може да оствари пројектне параметре паре на излазу. Детаљним анализама утврђено је да је минимална потребна температура на излазу из ложишта при употреби горива коришћених у симулацијама у границама 1010–1020 °C за гориво 8463, односно 1005–1015 °C за гориво 8226. Услови који су морали бити задовољени приликом одређивања оптималног опсега температуре, за доњу границу су параметри свеже и накнадно прегрејане паре, док се за горњу границу опсега посматра степен корисности котла, који опада са повећањем убризгавања воде за хлађење, те је потребно задовољити услове рада са минималним убризгавањем.

### Закључак

Представљен је сопствени математички модел процеса у ложишту парног котла и модел процеса формирања и деструкције  $\text{NO}_x$ . Развијени модел описује процесе формирања и деструкције горивог и термичког  $\text{NO}$ , који су најзаступљенији азотови оксиди у ложишту котла са сагоревањем угљеног праха. Модел је проверен поређењем са експерименталним резултатима за више погонских ситуација и постигнуто је добро слагање нумерички добијених вредности са мереним.

Испитивани тест случајеви су приказали утицај расподеле секундарног ваздуха на рад котла, као и утицај заптивености на излазну температуру гасова на крају ложишта и излазну концентрацију  $\text{NO}_x$ . Повећање протока секундарног ваздуха кроз главне горионике утиче на пораст излазне температуре на крају ложишта, као и на повећање емисије оксида азота. Побољшање заптивености котла утиче на пораст излазне температуре, с обзиром на мањи присис хладног ваздуха, а при томе, због контроле концентрације кисеоника, постигнуте на овај начин, долази до боље контроле емисије  $\text{NO}_x$ , која сада може бити смањена јер се стварају неповољни услови за настанак оксида азота. Такође је испитан и комбиновани утицај расподеле горива по висини ложишта и броја горионика у раду и уочена значајна редукација емисије  $\text{NO}_x$  и спуштање пламена при већем протоку горива кроз доње етаже, односно главне горионике.

Резултати симулација су верификовани, ради испитивања ефикасности и сигурности рада котла, термичким прорачуном парног котла и одређени су опсеги температуре гаса на излазу из ложишта за различита горива при којима целокупно енергетско постројење ради неометано, са што је могуће вишим степеном корисности. Радни режими за које је добијена температура нижа од минималне нису примењиви у пракси, с обзиром на неодговарајуће параметре прегрејане паре, док код режима са вишом температуром постоји опасност од оштећења грејних површина на излазу из ложишта.

Развијени модел је показао добре могућности предвиђања емисије  $\text{NO}_x$ . С обзиром на могућности анализе погонских услова у ложишту са становишта смањења емисије загађивача и одржања високе енергетске ефикасности котла, софтвер базиран на моделу представља ефикасну алатку која може помоћи у доношењу одлука при вођењу и ревитализацији котловског постројења.

### Захвалница

Развој и усавршавање софтвера подржан је од стране Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије у оквиру пројекта: „Повећање енергетске и еколошке ефикасности процеса у ложишту за угљени прах и оптимизација излазне грејне површине енергетског парног котла применом сопствених софтверских алата”, број: ТР–33018 и пројекта: „Унапређење индустријског постројења са флуидизованим слојем у оквиру развоја технологије за енергетски ефикасно и еколошки оправдано сагоревање различитих отпадних материја у флуидизационом ложишту”, број: ТР–33042, као и од стране ЈП „Електропривреда Србије”. Аутори желе да изразе посебну захвалност др Слободану Ђекићу за драгоцене савете и подршку.

### Литература

- [1] Zhou, H., *et al.*, Numerical Simulation of the  $\text{NO}_x$  Emissions in a 1000 MW Tangentially Fired Pulverized-Coal Boiler: Influence of the Multi-Group Arrangement of the Separated over Fire Air, *Energy & Fuels*, 25 (2011), 5, 2004–2012
- [2] Chui, E. H., Gao, H., Estimation of  $\text{NO}_x$  Emissions from Coal-Fired Utility Boilers, *Fuel*, 89 (2010), 10, 2977–2984
- [3] Tian, Zh. F., *et al.*, Numerical Modeling of Victorian Brown Coal Combustion in a Tangentially Fired Furnace, *Energy & Fuels*, 24 (2010), 9, 4971–4979
- [4] Karampinis, E., *et al.*, Numerical Investigation Greek Lignite/Cardoon Co-Firing in a Tangentially Fired Furnace, *Applied Energy*, 97 (2012), pp. 514–524, doi: 10.1016/j.apenergy.2011.12.032
- [5] Fan, J., *et al.*, Modeling of Combustion Process in 600 MW Utility Boiler using Comprehensive Models and its Experimental Validation, *Energy & Fuels*, 13 (1999), 5, 1051–1057
- [6] Karpenko, E. I., Messerle, V. E., Ustimenko, A. B., Plasma-Aided Solid Fuel Combustion, 31st Symposium on Combustion, Heidelberg, Germany, 2006, *Proceedings the Combustion Institute*, Pittsburg, Penn., USA, 2007, Vol. 2, 3353–3360
- [7] Zeng, L., *et al.*, Numerical Simulation of Combustion Characteristics and  $\text{NO}_x$  Emissions in a 300 MWe Utility Boiler with Different Outer Secondary-Air Vane Angles, *Energy & Fuels*, 24 (2010), 10, 5349–5358
- [8] Chen, Zh., Li, Zh., Zhu, Q., Jing, J., Gas/Particle Flow and Combustion Characteristics and  $\text{NO}_x$  Emissions of a New Swirl Coal Burner, *Energy*, 36 (2011), 2, 709–723
- [9] Modlinski, N., Computational Modeling of a Utility Boiler Tangentially-Fired Furnace Retrofitted with Swirl Burners, *Fuel Processing Technology*, 91 (2010), 11, 1601–1608

- [10] Coelho, L. M. R., Azevedo, J. L. T., Carvalho, M. G., Application of a Global NO<sub>x</sub> Formation Model to a Pulverized Coal Fired Boiler with Gas Reburning, *Proceedings*, 4<sup>th</sup> International Conference on Technologies and Combustion for a Clean Environment, Lisbon, Portugal, July 7-10, 1997, Paper 9.4, 1/8-8/8
- [11] Xu, M., Azevedo, J. L. T., Carvalho, M. G., Modelling of the Combustion Process and NO<sub>x</sub> Emission in a Utility Boiler, *Fuel*, 79 (2000), 13, 1611-1619
- [12] Zheng, Ch., *et al.*, Numerical and Experimental Investigation on the Performance of a 300 MW Pulverized Coal Furnace, *Proceedings of the Combustion Institute*, 29 (2002), 1, 811-818
- [13] He, R., *et al.*, Analysis of Low NO Emission in High Temperature Air Combustion for Pulverized Coal, *Fuel*, 83 (2004), 9, 1133-1141
- [14] Li, K., Thompson, S., Peng, J., Modelling and Prediction of NO<sub>x</sub> Emission in a Coal-Fired Power Generation Plant, *Control Engineering Practice*, 12 (2004), 6, 707-723
- [15] Diez, L. I., Cortes, C., Pallares, J., Numerical Investigation of NO<sub>x</sub> Emissions from a Tangentially-Fired Utility Boiler under Conventional and Overfire Air Operation, *Fuel*, 87 (2008), 7, 1259-1269
- [16] Belošević, S., *et al.*, A Numerical Study of a Utility Boiler Tangentially-Fired Furnace under Different Operating Conditions, *Fuel*, 87 (2008), 15-16, 3331-3338
- [17] Belošević, S., *et al.*, Numerical Prediction of Pulverized Coal Flame in Utility Boiler Furnaces, *Energy & Fuels*, 23 (2009), 11, 5401-5412
- [18] Belošević, S., *et al.*, Numerical Analysis of NO<sub>x</sub> Control by Combustion Modifications in Pulverized Coal Utility Boiler, *Energy & Fuels*, 26 (2012), 1, 425-442
- [19] Belošević, S., *et al.*, Three-Dimensional Modeling of Utility Boiler Pulverized Coal Tangentially Fired Furnace, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49 (2006), 19-20, 3371-3378
- [20] Belošević, S., Sijerčić, M., Stefanović, P., A Numerical Study of Pulverized Coal Ignition by Means of Plasma Torches in Air-Coal Dust Mixture Ducts of Utility Boiler Furnaces, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51 (2008), 7-8, 1970-1978
- [21] Hashimoto, N., *et al.*, A Numerical Analysis of Pulverized Coal Combustion in a Multiburner Furnace, *Energy & Fuels*, 21 (2007), 4, 1950-1958
- [22] Makovička, J., Mathematical Model of Pulverized Coal Combustion, Ph. D. thesis, Czech Technical University, Prague, Czech Republic, 2008
- [23] Straka, R., Beneš, M., Numerical Simulation of NO Production in Air-Staged Pulverized Coal Fired Furnace, *The Open Thermodynamics Journal*, 4 (2010), Special Issue: Numerical Analysis of Heat and Mass Transfer in Energy Conversion Systems, 27-35
- [24] Lockwood, F. C., Romo-Millares, C. A., Mathematical Modeling of Fuel NO Emissions from PF Burners, *Journal of the Institute of Energy*, 65 (1992), 144-152
- [25] Hill, S. C., Smoot, L. D., Modeling of Nitrogen Oxides Formation and Destruction in Combustion Systems, *Progress in Energy and Combustion Science*, 26 (2000), 4-6, 417-458
- [26] Eaton, A. M., Smoot, L. D., Hill, S. C., Eatough, Components, Formulations, Solutions, Evaluation, and Application of Comprehensive Combustion Models, *Progress in Energy and Combustion Science*, 25 (1999), 4, 387-436
- [27] Сијерчић, М., Математичко моделирање комплексних турбулентних транспортних процеса, Југословенско друштво термичара и Институт за нуклеарне науке "Винча", Београд, 1998
- [28] Белошевић, С., Прилог моделирању процеса у ложишту котла за сагоревање угљеног праха, Докторска дисертација, Београд, 2003
- [29] Hottel, H., Sarofim, A., *Radiative Transfer*, McGraw-Hill, New York, 1967
- [30] Patankar, S., *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere Publ., Washington, USA, 1980
- [31] Stone, H. L., Iterative Solution of Implicit Approximations of Multidimensional Partial Differential Equations, *SIAM Journal on Numerical Analysis*, 5 (1968), 530-558
- [32] De Soete, G., Overall Reaction Rates of NO and N<sub>2</sub> Formation from Fuel Nitrogen, 15<sup>th</sup> Symposium on Combustion, Tokyo, Japan, *Proceedings*, The Combustion Institute, Pittsburgh, Penn., USA, 1975

**Abstract****Numerical Optimisation of Processes in the Furnace Considering NO<sub>x</sub> Emission and Efficiency of Utility Boiler**

by

*Ivan D. TOMANOVIĆ*<sup>1\*</sup>, *Srdjan V. BELOŠEVIĆ*<sup>1</sup>, *Miroslav A. SIJERČIĆ*<sup>1</sup>,  
*Vladimir B. BELJANSKI*<sup>1</sup>, *Dragan R. TUCAKOVIĆ*<sup>2</sup>,  
*Titoslav V. ŽIVANOVIĆ*<sup>2</sup>, and *Stevan Dj. NEMODA*<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Vinča Institute of Nuclear Sciences, University of Belgrade, Belgrade, Serbia

<sup>2</sup>Faculty of Mechanical Engineering, University of Belgrade, Belgrade, Serbia

Mathematical model, aimed for prediction of processes in TE Kostolac B power plant utility boiler furnace tangentially fired by pulverized lignite, was developed in-house. The model was applied in numerical analysis of boiler operation, in order to reduce NO<sub>x</sub> emission by combustion modifications in the furnace, while maintaining high efficiency of the boiler unit. Complex two-phase gas-particle flow was modelled using Euler-Lagrange approach. Coupling between phases was done by using PSI-Cell concept. In order to perform necessary analysis, NO formation/destruction sub-model was implemented, within comprehensive combustion code, used to predict emission from the furnace. Thermal and fuel NO were modelled, as the most influential nitrogen oxides during pulverized coal combustion process. The computational code was developed to be easily used by engineering staff dealing with the process analysis in boiler units. Numerical simulations were performed for the boiler fired by the lignite Drmno, under different operating conditions. Contradictory requirements with respect to emission reduction and efficient combustion with safe operation of super-heaters often require boiler to operate within narrow limits of operation parameters, which is determined by means of the boiler thermal calculation.

Key words: *mathematical model, thermal calculation, boiler furnace, pulverized coal, NO<sub>x</sub> emission*

\* Corresponding author; e-mail: ivan.tomanovic@vin.bg.ac.rs

Рада примљен: 10. априла 2013.  
Рад ревидиран: 10. новембра 2013.  
Рад прихваћен: 15. децембра 2013.