

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

Горан М. Ступар

**ПРИМАРНЕ МЕРЕ РЕДУКЦИЈЕ
АЗОТНИХ ОКСИДА У ЛОЖИШТУ
ПАРНОГ КОТЛА**

МОНОГРАФИЈА



МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ

Београд, 2021.

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

Горан М. Ступар

**ПРИМАРНЕ МЕРЕ РЕДУКЦИЈЕ
АЗОТНИХ ОКСИДА У ЛОЖИШТУ
ПАРНОГ КОТЛА**

МОНОГРАФИЈА

МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ
Београд, 2021.

Др Горан Ступар, доцент

gstupar@mas.bg.ac.rs

ПРИМАРНЕ МЕРЕ РЕДУКЦИЈЕ АЗОТНИХ ОКСИДА У ЛОЖИШТУ ПАРНОГ КОТЛА

Рецензенти:

Др Драган Туцаковић, редовни професор, Машински факултет, Универзитет у Београду

Др Срђан Белошевић, научни саветник, Институт за нуклеарне науке „Винча” – Институт од националног значаја за Републику Србију, Универзитет у Београду

Др Љубиша Бркић, редовни професор у пензији, Машински факултет, Универзитет у Београду

Издавач:

МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ
Универзитет у Београду
Краљице Марије 16, Београд
Тел. (011) 3370 760
www.mas.bg.ac.rs

За издавача:

Проф. др Радивоје Митровић, декан

Главни и одговорни уредник:

Проф. др Милан Лечић

Одобрено за штампу одлуком Декана Машинског факултета у Београду број 02/2021 од 18.02.2021. године.

Тираж: 30 примерака

Штампа:

ПЛАНЕТА ПРИНТ
Игора Васиљева 33р, Београд
Тел. (011) 6506564

ISBN 978-86-6060-063-1

ПРЕДГОВОР

Тему ове монографије представља истраживање сложених процеса у ложишту парног котла који функционише са вишестепеним довођењем ваздуха по висини ложишта, као главном примарном мером редукције азотних оксида. Ова комплексна област још увек није довољно истражена, нарочито у домену утицаја нове шеме сагоревања на топлотни процес у ложишту и рад парног котла у целини. Приказаним истраживањем афирмисан је приступ примене нумеричких прорачуна издвојеног елемента сложеног енергетског система чиме је омогућено дефинисање главних праваца промена које су настале у ложишту са новом организацијом сагоревања, што је резултирало могућношћу проширења нормативних инжењерских метода.

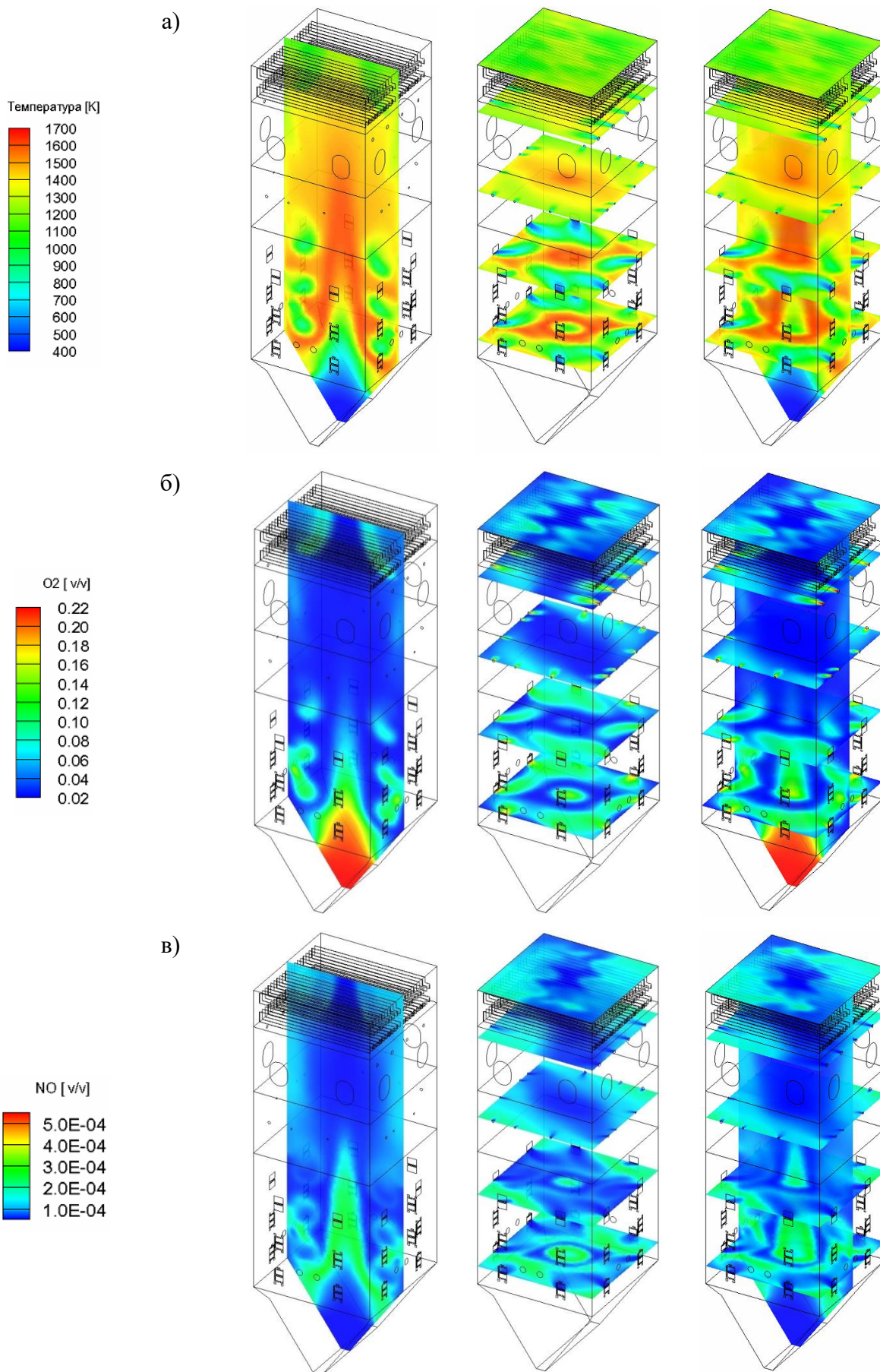
Проширење постојећих једнодимензијских процедура, изворно намењених само надстехиометријским условима рада, извршено је дефинисањем главних утицајних параметара на процесе у домену где се сагоревање одвија у условима недостатка кисеоника. На овакав начин допуњена методологија омогућила је примену интегралних прорачуна који као такви захтевају скромније рачунарске капацитете и неупоредиво мањи утрошак времена уз значајно сужење простора за рачунску грешку. Потврдом резултата прорачуна са радним параметрима на реалним термоенергетским постројењима створени су услови за проширење области примене једнодимензијских модела. Овим је сачувано, у области примењених инжењерских метода, акумулирано искуство у пројектовању и праћењу рада енергетских парних котлова.

Један од главних циљева спроведеног истраживања је да се оваква методологија може применити за испитивање могућности продужења радног века енергетских постројења у Републици Србији која су у експлоатацији преко 30 година. Како би задовољили све строже еколошке норме које се односе на садржај азотних оксида постојећи системи морају имплементирати нове концепције сагоревања. Овакве процедуре могу се применити и за проверу радних параметара нових постројења, на начин на који се то данас не врши, са могућностима испитивања мера за повећање њихове сигурности и ефикасности.

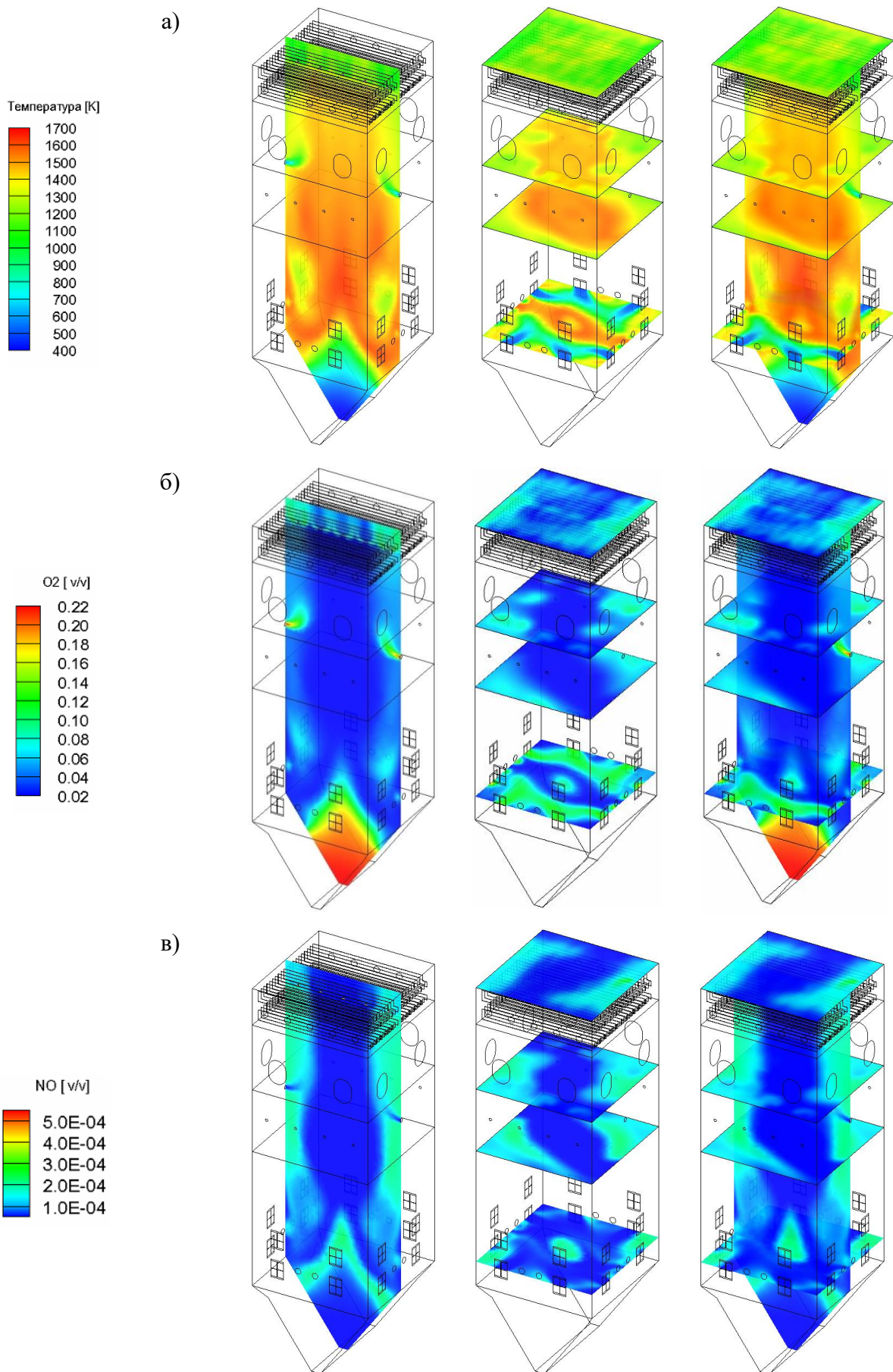
Приказани модел примењен је за процену радних услова енергетских парних котлова у Републици Србији, који раде са новим шемама организације сагоревања примарним мерама редукције азотних оксида. У овој публикацији приказани су резултати процене рада енергетског парног котла за различита оптерећења при промени места и количине ваздуха који се уводи по висини његовог ложишта.

Овом приликом захваљујем се мом професору и ментору Драгану Туцаковићу на свесрдној помоћи, разумевању и пренесеном искуству које ми је било од великог значаја при обради приказане теме.

1. УВОД	7
1.1. Тема монографије	7
1.2. Преглед литературе.....	12
1.3. Предмет и циљеви истраживања	16
2. ОПИС РАДА СЛОЖЕНОГ КОТЛОВСКОГ ПОСТРОЈЕЊА	23
2.1. Систем припреме угљеног праха	23
2.2. Нумерички прорачуни у систему прорачуна котлова	25
2.3. Топлотни биланс парног котла.....	26
2.4. Топлотни и материјални биланс млинског сушења	27
2.5. Термички прорачун парног котла	29
2.6. Аеродинамички прорачуни млинског и ваздушног тракта	32
3. РАЧУНАРСКА МЕХАНИКА ФЛУИДА (CFD).....	33
3.1. Моделирање транспортних једначина.....	34
3.1.1. Једначина одржања масе	34
3.1.2. Једначина промене количине кретања	35
3.1.3. Једначине моделирања турбуленције.....	36
3.1.4. Једначине енергије гасовите компоненте сложеног тока	36
3.1.5. Једначина кретања честица чврсте компоненте	38
3.1.6. Једначине енергије чврсте компоненте сложеног тока.....	39
3.1.7. Једначина моделирања топлотног преноса енергије зрачењем.....	41
3.1.8. Једначина моделирања настајања и деструкције азотних оксида	41
3.2. Нумерички прорачун ложишта са конвенционалним системом сагоревања	46
3.3. Нумерички прорачун ложишта са вишестепеним довођењем ваздуха	52
3.4. Промене у ложишту настале вишестепеним довођењем ваздуха	59
4. ПРОРАЧУН ПРОЦЕСА У ЛОЖИШТУ И ПРИКАЗ РЕЗУЛТАТА	63
4.1. Допуњена метода модификованог зоналног прорачуна	63
4.1.1. Расподела ваздуха по зонама ложишта	64
4.1.2. Расподела продуката сагоревања по зонама ложишта	66
4.1.3. Излазна стања продуката сагоревања по зонама ложишта	68
4.2. Прилагођавање и примена допуњеног модификованог зоналног метода	82
4.3. Валидација модела - рад постројења у погонским условима.....	88
4.4. Оптимизација вишестепеног довођења ваздуха	95
4.5. Промена запрљаности ложишта и хладне рецикулације.....	104
4.6. Рад котла при промени продукције и постизање радних параметара	108
4.7. Рад котла при промени односа ослобођене и пренесене енергије.....	113
4.8. Погонско постизање радних параметара парног котла.....	117
5. ЗАКЉУЧАК	122
ПРИЛОГ	125
ЛИТЕРАТУРА.....	135



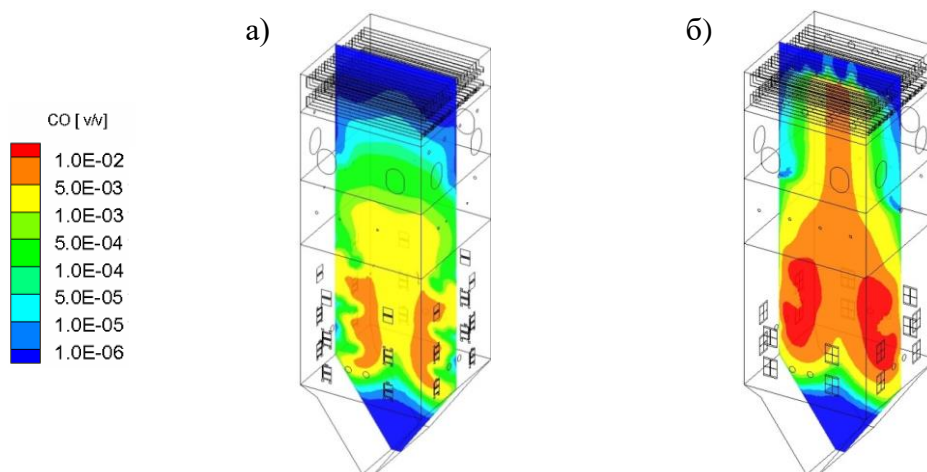
Слика 23. Рад котла са ВЗД 2 у ложишту, при номиналној продукцији, горивом од 8373,6 kJ/kg и 6 горионика: а) температурско поље; б) поље O₂; в) поље NO



Слика 24. Рад котла са ВЗД 2 изнад ложишта, при номиналној продукцији, горивом од 8373,6 kJ/kg и 6 горионика: а) температурско поље; б) поље O₂; в) поље NO

На слици 23 приказана су поља температуре, кисеоника и азот-моноксида у средишњем уздужном и специфичним попречним пресецима прорачунског домена. Приказане вредности односе се на функционисање котла са вишестепеним довођењем ваздуха када су оба нивоа ваздуха за догоревање смештена у ложишту. Поље температуре у уздужном пресеку упућује на то да се највећи део сагоревања одвија у области горионика. Могу се приметити и области високих температура на нивоу првог степена дозирања ваздуха, а као последица нешто одложеног догоревања дела сагорљивих компонената. Поље кисеоника у уздужном пресеку домена указује на значајно редуковану концентрацију оксиданта применом система дозирања ваздуха, што и резултира снижењем крајње концентрације азотних оксида. У попречним пресецима може се уочити да зонама интензивне реакције, односно највиших температура одговарају области потрошеног кисеоника, што је и очекивано. Поређењем са пољем азот-моноксида може се приметити да се његове веће концентрације јављају у областима нивоа главних горионика на местима максималних локалних температура. Значајно је још приметити да се код оваквог система јављају термички продуктовани оксиди азота у средишту централног вртлога, што није био случај код рада ложишта са конвенционалним сагоревањем што указује на раст локалних температура гасова.

На слици 24 приказана су карактеристична поља при раду реорганизованог система сагоревања, када је други ниво ваздуха за догоревање изнад ложишта. Анализом резултата може се закључити да је температурско поље уједначено по висини. Овакво температурско поље нема доминантну зону максималне температуре продуката сагоревања што указује на равномерно успорену реакцију сагоревања. У областима другог нивоа дозирања приметне су, у средишњем делу, зоне трошења кисеоника, што указује на место потпуног завршетка реакције. Услед општег недостатка кисеоника у ложишту, количина формираних азотних оксида је битно редукована. Најзначајније количине азот-моноксида настају у областима око зидова ложишта где постоји блага концентрација слободног кисеоника.

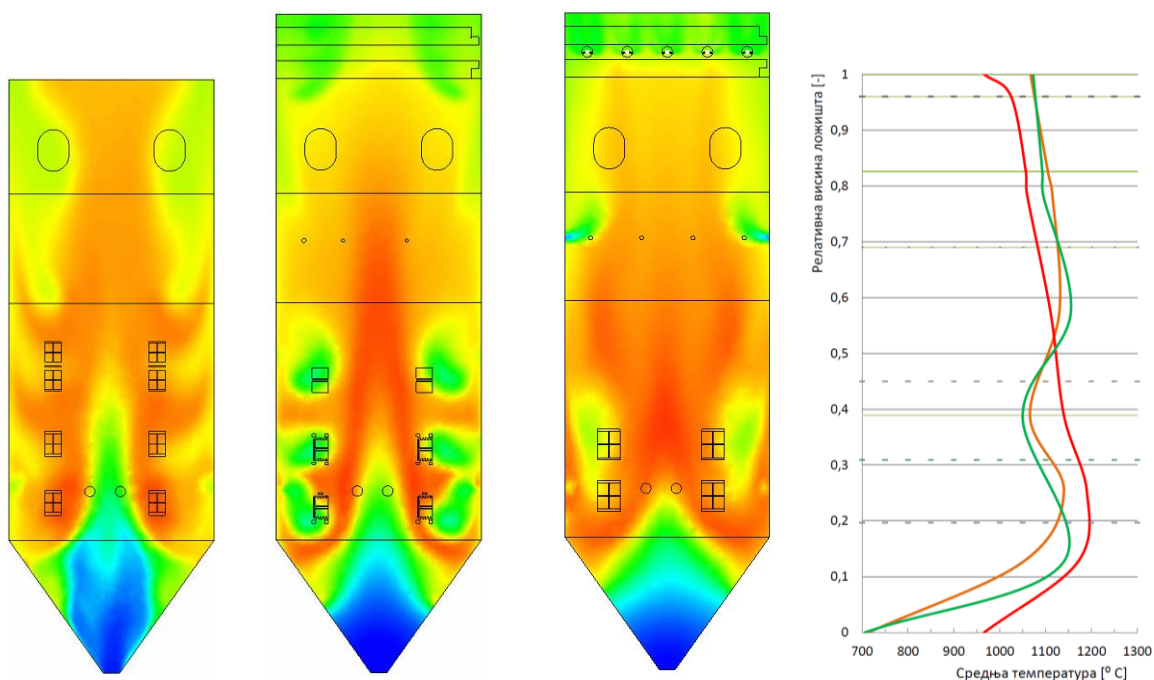


Слика 25. Рад котла са подстехиометријским системом сагоревања при номиналној продукцији, горивом од 8373,6 kJ/kg и 6 горионика у раду - поља угљен-моноксида
 а) ВЗД 2 у ложишту; б) ВЗД 2 изнад ложишта

Подстехиометријско сагоревање које је остварено у ложишном простору, са циљем остваривања повољног амбијента за успоравање реакције формирања азотних оксида, уједно повећава могућност појаве непотпуног сагоревања и заостајања горивих гасова. Услед тога, при испитивању рада у оваквим условима, неопходно је проверити садржај угљен-моноксида у излазним продуктима сагоревања. На слици 25 приказана су поља угљен-моноксида за оба приказана система. Може се приметити да у случају рада са коначним дозирањем ваздуха пред излаз из ложишта нема заосталог угљен-моноксида, као и то да је његово догоревање након места увођења малог интензитета, што указује на висок степен завршетка реакције у ложишту. Насупрот њему, при коначном дозирању ваздуха у зону изнад ложишта долази до значајнијег догоревања угљен-моноксида у првом делу излазног прегрејача, одакле следи да је степен одвијања реакције сагоревања у ложишту донекле мањи.

3.4. Промене у ложишту настале вишестепеним довођењем ваздуха

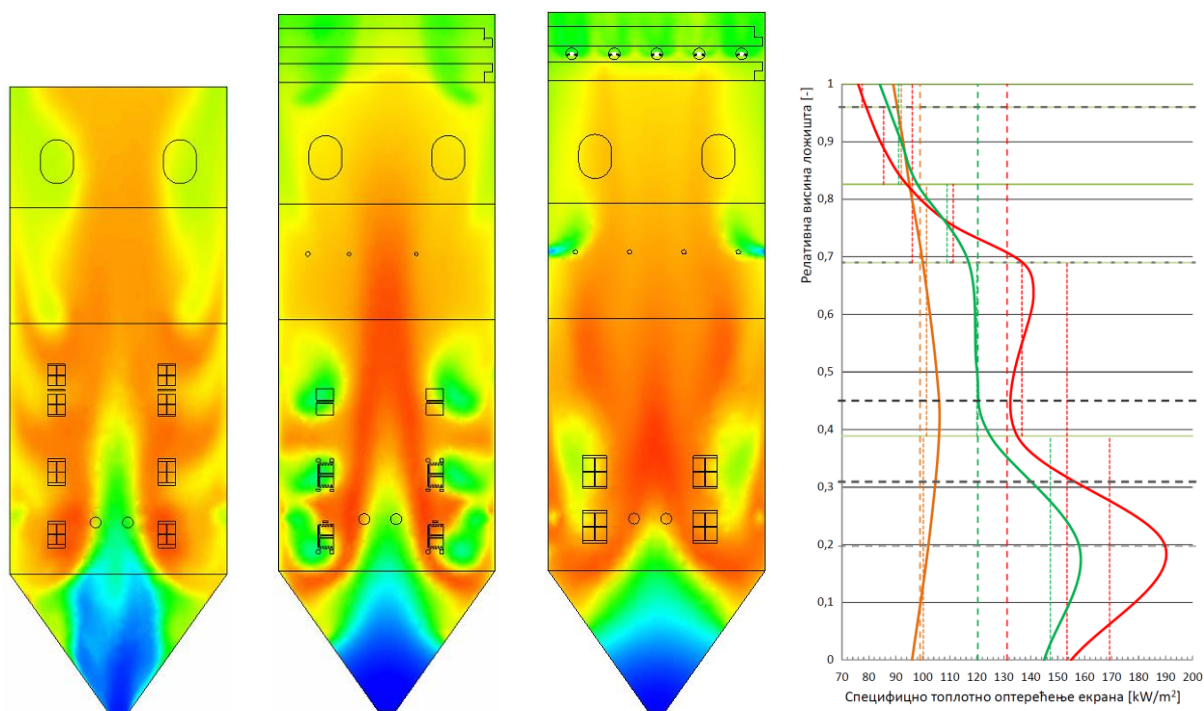
Након спроведених процедура процене рада енергетског парног котла за разматране концепције сагоревања угљеног праха у ложишту су настале одређене промене. Поређени су радни режими који се односе на погон постројења при номиналној продукцији од 277,8 kg/s, са горивом доње топлотне моћи 8373,6 kJ/kg и 6 горионика у раду. Параметри њиховог рада детаљно су приказани у [90] за конвенционално сагоревање (концепција 1) и за реорганизоване системе сагоревања угљеног праха (концепције 2 и 3).



Слика 26. Температурско поље и промена средње температуре по висини ложишта за рад котла са различитим концепцијама сагоревања

— концепција 1. конвенционално сагоревање; — концепција 2. довођење ВЗД 2 пред излаз из ложишта; — концепција 3. довођење ВЗД 2 у зони изнад ложишта

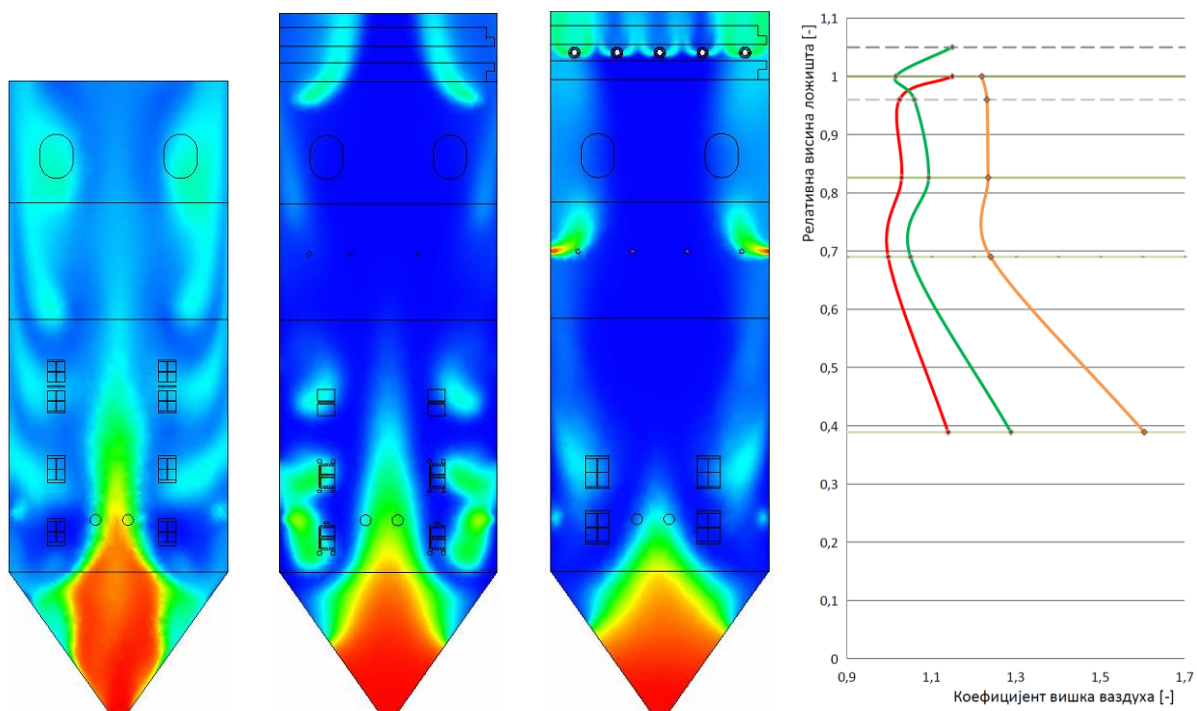
Упоредном анализом поља температура, приказаних на слици 26 може се приметити да се у зони главних горионика највиша средња температура продуката сагоревања постиже при концепцији 2. При раду са оваквом организацијом сагоревања, уједно је постигнута и најнижа средња температура продуката сагоревања на излазу из ложишта. Оваква појава сугерише да је количина топлоте апсорбована у оваквом ложишту повећана, што потврђује и профил специфичног топлотног оптерећења по висини ложишта приказан на слици 29. Даљим увидом у профил средње температуре продуката сагоревања по висини ложишта примећује се да је његов карактер за концепције 1 и 3 сличан, а да се одликују нешто вишом температуром у нивоу главних горионика при вишестепеном довођењу ваздуха. Оваква појава указује на то да је постигнут сличан однос ослобођене и апсорбоване енергије по зонама, иако је у конвенционалном систему на нивоу главних горионика уведено 70 %, а код реорганизованог система целокупна количина угљеног праха. Одавде може да се закључи да је ово мера до које је реакција код ложишта концепције 3, изазвана недовољним присуством кисеоника, успорена. На слици 27 се такође уочава да је и поред овако уједначених средњих температура по висини ложишта количина топлоте која се апсорбује од стране испаривачких панела при концепцији 3 повећана. Прегледом профила специфичног топлотног оптерећења свих разматраних концепција може се закључити да је енергија која се апсорбује у ложишту, а при његовом раду у подстехиометријским условима, увек већа од оне у конвенционалним.



Слика 27. Температурско поље и промена специфичног топлотног оптерећења зидова ложишта по висини за рад котла са различитим концепцијама сагоревања

- концепција 1. конвенционално сагоревање; — концепција 2. довођење ВЗД 2 пред излаз из ложишта; — концепција 3. довођење ВЗД 2 у зони изнад ложишта

Поређењем поља кисеоника у три анализирана случаја, приказана на слици 28, лако се уочавају разлике настале променом концепције сагоревања. У конвенционалним условима рада ложишта значајне су количине вишка кисеоника, пошто је пројектовано да се због презасићености реакције сагоревања она у потпуности заврши у ограниченом простору ложишта. Мера трошења кисеоника представљена је нагибом криве промене коефицијента вишка ваздуха по висини ложишта. Крива промене у условима сталног вишка кисеоника указује на пресек ложишта у коме се реакција сагоревања у највећем обиму завршава. У условима реорганизованог сагоревања, при концепцији 3, може се уочити већи садржај слободног кисеоника дуж готово целокупне висине ложишта. Овакав ток процеса у ложишту условљен је поменутиим успореним одвијањем реакције у подстехиометријским условима. На оба нивоа довођења ваздуха за догоревање постоји сличан карактер промене коефицијента вишка ваздуха, који се разликују само по месту увођења коначне количине ваздуха. После обе зоне увођења ваздуха приметно је повећање коефицијента вишка ваздуха, с тим што се након благог почетног раста на првом нивоу довођења ваздуха за догоревање наставља трошење кисеоника. Карактер криве у овој области указује на то да је трошење кисеоника након првог места увођења ваздуха код концепције 3 интензивније, односно да се на истом нивоу довођења ваздуха код концепције 2 сагоревање у већој мери већ завршило. Крива у области другог нивоа довођења ваздуха у оба разматрана случаја има стрмији карактер што

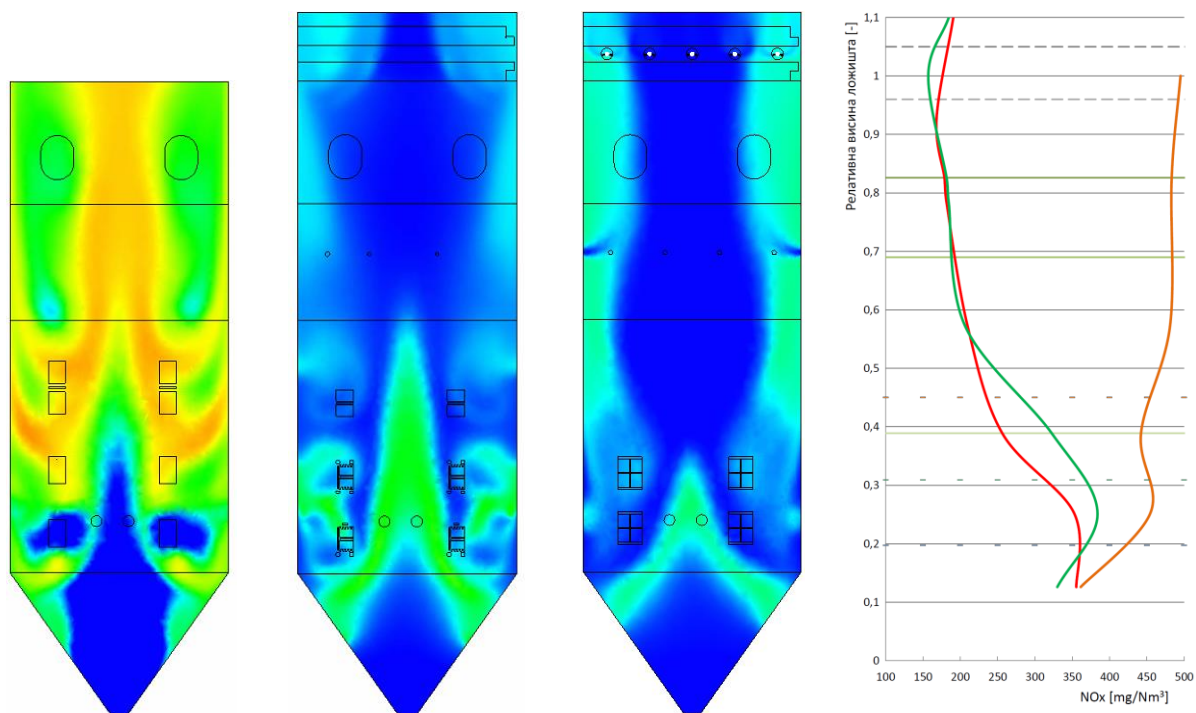


Слика 28. Поље O_2 и промена коефицијента вишка ваздуха по висини ложишта за рад котла са различитим концепцијама сагоревања

— концепција 1. конвенционално сагоревање; — концепција 2. довођење ВЗД 2 пред излаз из ложишта; — концепција 3. довођење ВЗД 2 у зони изнад ложишта

указује на мале количине које догоревају у излазним зонама домена, односно да је количина ваздуха која се доводи у ову зону значајно већа од оне која се у њој троши. Нагиби ових промена указују на то да је завршно догоревање нешто обимније у концепцији где се оно довршава након ложишта.

Поље азот-моноксида и промена његове осредњене вредности по висини домена приказана је за све три концепције на слици 29. Лако се могу запазити драстичне разлике у концентрацији оксида азота, како у излазним пресецима домена, тако и по целој висини ложишта. У конвенционалним условима сагоревања, при великим уделима слободног кисеоника, концентрација формираног азот-моноксида расте готово по целој висини ложишта. Оваква појава је очекивана и као резултат има битно повећан садржај азот-моноксида у продуктима сагоревања. Концепције 2 и 3 предвиђене су у оквиру примарних мера редукције азотних оксида па као крајњи резултат имају значајно мање концентрације продуктованих оксида азота. Прве количине азотних оксида настају у зонама главног горионика и оне су највећим делом условљене великом концентрацијом кисеоника доведеног у процес кроз ложишни левак, али и делом због високих локалних температура у зонама пламена. Након почетног раста у зонама горионика, долази до смањења концентрације, која опада све до увођења ваздуха за догоревање на коначном нивоу. Овај пад настаје због доминантније реакција деструкције азотних оксида у подстехиометријској зони ложишта.



Слика 29. Поље NO и промена концентрација азот-моноксида по висини ложишта за рад котла са различитим концепцијама сагоревања

— концепција 1. конвенционално сагоревање; — концепција 2. довођење ВЗД 2 пред излаз из ложишта; — концепција 3. довођење ВЗД 2 у зони изнад ложишта

ЛИТЕРАТУРА

- [1] EIA International Energy Outlook 2013, [https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484\(2013\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484(2013).pdf).
- [2] U.S. Energy Information Administration – Annual Energy Outlook 2015 with projection to 2040, [https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/0383\(2015\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/0383(2015).pdf).
- [3] Energy Strategy of Russian Federation, Saint-Petersburg Polytechnic University of Peter the Great.
- [4] Стратегија развоја енергетике Републике Србије до 2025. године са пројекцијама до 2030. године, Службени гласник РС, број 101, 2015.
- [5] Ј. Ђуковић, В. Бојанић, Аерозагађење - појам, стање, извори, контрола и технолошка решења, Д.П. Институт заштите и екологије - Бања Лука, Бања Лука, 2000.
- [6] Directive 2010/75/EU European Union e limit of emissions of harmful substances into the air from large furnace.
- [7] Zh F. Tian, P.J. Witt, M.P. Schwarz, W. Yang, Numerical modeling of Victorian brown coal combustion in a tangentially fired furnace, *Energy Fuels* 24 (2010) 4971-4979.
- [8] L. Zeng, Zh Li, G. Zhao, Sh Shen, F. Zhang, Numerical simulation of combustion characteristics and NO_x emissions in a 300 MWe utility boiler with different outer secondary-air vane angles, *Energy Fuels* 24 (2010) 5349-5358.
- [9] J. Makovicka, Mathematical model of pulverized coal combustion, Czech Technical University in Prague, Faculty of Nuclear Sciences and Physical Engineering, Prague, Czech Republic, 2008.
- [10] S.C. Hill, L.D. Smoot, Modeling of nitrogen oxides formation and destruction in combustion systems, *Prog. Energy Comb. Sci.* 26 (2000) 417-458.
- [11] R.G. Heinsohn, R.L. Kabel, Sources and Control of Air Pollution, Prentice - Hall, New Jersey, 1999.
- [12] Tobin, D. Moyeda, W. Zhou, R. Payne, Application of Layered Control Technologies to Significantly Reduce NO_x Emissions from Coal-Fired Boilers, GE Energy, 2nd U.S.-China NO_x Workshop Dalian, China, 2005.
- [13] Steam / its generation and use, Babcock and Wilcox, New York (1972).
- [14] T. Le Bris, F. Cadavid, S. Caillat, S. Pietrzyk, J. Blondin, B. Baudoin, Coal combustion modelling of large power plant, for NO_x abatement, *Fuel* 86 (2007) 2213-2220.

- [15] L.I. Diez, C. Cortes, J. Pallares, Numerical investigation of NO_x emissions from a tangentially-fired utility boiler under conventional and overfire air operation, *Fuel* 87 (2008) 1259-1269.
- [16] Бабий В.И., Котлер В.Р. Вербовецкий Э.Х., Механизм образования и способы подавления оксидов азота в пылеугольных котлах, *Энергетик*, (1996), 8-13.
- [17] L. Shi, Z. Fu, X. Duan, C. Cheng, Y. Shen, B. Liu, Influence of combustion system retrofit on NO_x formation characteristics in a 300 MWe tangentially fired furnace, *Applied Thermal Engineering* 98 (2016) 766-777.
- [18] А.В. Жуйков, Снижение оксидов азота в топках котлов, *Journal of Siberian Federal University Engineering & Technologies* 6 (2011) 620-628.
- [19] J. Baltasar, M. Carvalho, P. Coelho and M. Costa, Flue gas recirculation in a gas-fired laboratory furnace: measurements and modelling, *Fuel* 76 (1997), 919-929.
- [20] X. Zhang, J. Zhou, S. Sun, R. Sun, M. Qin, Numerical investigation of low NO_x combustion strategies in tangentially-fired coal boilers, *Fuel* 142 (2015) 215-221.
- [21] J. H. Yang, J. E. A. Kim, J. Hong, M. Kim, C. Ryu, Y. J. Kim, H. Y. Park, S. H. Baek, Effects of detailed operating parameters on combustion in two 500-MWe coal-fired boilers of an identical design, *Fuel* 144 (2015) 145-156.
- [22] D. Tian, L. Zhong, P. Tan, L. Ma, Q. Fang, C. Zhang, Influence of vertical burner tilt angle on the gas temperature deviation in a 700 MW low NO_x tangentially fired pulverised-coal boiler, *Fuel Processing Technology* 138 (2015) 616-628.
- [23] J. Yang, R. Sun, S. Sun, N. Zhao, N. Hao, H. Chen, Y. Wang, H. Guo, J. Meng, Experimental study on NO_x reduction from staging combustion of high volatile pulverized coals. Part 1. Air staging, *Fuel Processing Technology* 126 (2014) 266-275.
- [24] J. Yang, R. Sun, S. Sun, N. Zhao, N. Hao, H. Chen, Y. Wang, H. Guo, J. Meng, Experimental study on NO_x reduction from staging combustion of high volatile pulverized coals. Part 2. Fuel staging, *Fuel Processing Technology* 138 (2015) 445-454.
- [25] Z. Li, G. Liu, Q. Zhu, Z. Chen, F. Ren, Combustion and NO_x emission characteristics of a retrofitted down-fired 660 MWe utility boiler at different loads, *Applied Energy* 88 (2011) 2400-2406.

- [26] G. Liu, Z. Li, Z. Chen, X. Zhu, Q. Zhu, Effect of the anthracite ratio of blended coals on the combustion and NO_x emission characteristics of a retrofitted down-fired 660-MWe utility boiler, *Applied Energy* 95 (2012) 196-201.
- [27] G. Liu, Z. Chen, Z. Li, G. Li, Q. Zong, Numerical simulations of flow, combustion characteristics, and NO_x emission for down-fired boiler with different arch-supplied over-fire air ratios, *Applied Thermal Engineering* 75 (2015) 1034-1045.
- [28] J. Wang, W. Fan, Y. Li, M. Xiao, K. Wang, P. Ren, The effect of air staged combustion on NO_x emissions in dried lignite combustion, *Energy* 37 (2012) 725-736.
- [29] E. Korytnyi, R. Saveliev, M. Perelman, B. Chudnovsky, E. Bar-Ziv, Computational fluid dynamic simulations of coal-fired utility boilers: an engineering tool, *Fuel* 88 (2009) 9-18.
- [30] C.R. Choi, C.N. Kim, Numerical investigation on the flow, combustion and NO_x emission characteristics in a 500 MWe tangentially fired pulverized-coal boiler, *Fuel* 88 (2009) 1720-1731.
- [31] L. Huang, Z. Li, R. Sun, J. Zhou, Numerical study on the effect of the over fire air to the air flow and coal combustion in a 670t/h wall-fired-boiler, *Fuel Process. Technol.* 87 (2006) 363-371.
- [32] S. Belosevic, M. Sijercic, N. Crnomarkovic, B. Stankovic, D. Tucakovic, Numerical prediction of pulverized coal flame in utility boiler furnaces, *Energy Fuels* 23 (2009) 5401-5412.
- [33] S. Belosevic, M. Sijercic, D. Tucakovic, S. Oka, Three-dimensional modeling of utility boiler pulverized coal tangentially fired furnace, *Heat Mass Transf.* 49 (2006) 3371-3378.
- [34] S. Belosevic, M. Sijercic, D. Tucakovic, N. Crnomarkovic, A numerical study of a utility boiler tangentially-fired furnace under different operating conditions, *Fuel* 87 (2008) 3331-3338.
- [35] C.H. Scott, L.D. Smoot, A comprehensive three-dimensional model for simulation of combustion systems: PCGC-3, *Energy&Fuels* 7 (1993), 874-883.
- [36] J. Fan, L. Qian, Y. Ma, P. Sun, K. Cen, Computational modeling of pulverized coal combustion processes in tangentially fired furnaces, *Chemical Engineering Journal* 81 (2001), 261-269.
- [37] L. X. Zhou, L. Li, R. X. Li, J. Zhang, Simulation of 3-D gas-particle flows and coal combustion in a tangentially fired furnaces using a two-fluid trajectory model, *Powder Technology* 125 (2002), 226-233.

- [38] S.H. Baek, H.Y. Park, S.H. Ko, The effect of the coal blending method in a coal fired boiler on carbon in ash and NO_x emission, *Fuel* 128 (2014) 62-72.
- [39] R.I. Backreedy, J.M. Jones, L. Ma, M. Pourkashanian, A. Williams, A. Arenillas, B. Arias, J.J. Pis, F. Rubiera, Prediction of unburned carbon and NO_x in a tangentially fired power station using single coals and blends, *Fuel* 84 (2005) 2196-2203.
- [40] Y. Zhou, T. Xu, S. Hui, M. Zhang, Experimental and numerical study on the flow fields in upper furnace for large scale tangentially fired boilers, *Appl. Therm. Eng.* 29 (2009) 732-739.
- [41] S. Belosevic, V. Beljanski, I. Tomanovic, N. Crnomarkovic, D. Tucakovic, T. Zivanovic, Numerical analysis of NO_x control by combustion modifications in pulverized coal utility boiler, *Energy Fuels* 26 (2012) 425-442.
- [42] W.P. Adamczyk, S. Werle, A. Ryfa, Application of the computational method for predicting NO_x reduction within large scale coal-fired boiler, *Appl. Therm. Eng.* 73 (2014) 343-350.
- [43] S. P. Visona, B. R. Stanmore, Modeling NO, Release from a Single Coal Particle I. Formation of NO from Volatile Nitrogen, *Combustion and Flame* 105 (1996) 92-103.
- [44] R.P. Van der Lans, P. Glarborg, K. Dan-Johansen, Influence of process parameters on nitrogen oxide formation in pulverized-coal burners. *Progress in Energy and Combustion Science* 23 (1997) 4349-4377.
- [45] V.I. Kouprianov, V. Tanetsakunvatanab, Optimization of excess air for the improvement of environmental performance of a 150 MW boiler fired with Thai lignite, *Applied Energy* 74 (2003) 445-453.
- [46] N. Orfanoudakis, A. Vakalis, K. Krallis, A. Hatziapostolou, N. Vlachakis, Emission reduction techniques & economics in coal-fired power plants, *International conference on modelling, monitoring and management of air pollution No12, Rhodes, Grece*, (2004) 14, 791-800.
- [47] V.I. Kouprianov, Influence of lignite quality on airborne emissions from power generation in the Russian Far East and in Northern Thailand, *Fuel Processing Technology* 76 (2002) 187-199.
- [48] B.R. Stanmore, S.P. Visona, Prediction of NO emissions from a number of coal-fired power station boilers, *Fuel Processing Technology* 64 (2000) 25-46.

- [49] P. Plaza, A. J. Griffiths, N. Syred, T. Rees-Gralton, Use of a Predictive Model for the Impact of Cofiring Coal/Biomass Blends on Slagging and Fouling Propensity, *Energy & Fuels* 23 (2009) 3437-3445.
- [50] V.I. Koupryanov, Modeling of thermal characteristics for a furnace of a 500 MW boiler fired with high-ash coal, *Energy* 26 (2001) 839-853.
- [51] T. Asotani, T. Yamashita, H. Tominaga, Y. Uesugi, Y. Itaya, S. Mori, Prediction of ignition behavior in a tangentially fired pulverized coal boiler using CFD, *Applied Fuel* 87 (2008) 482-490.
- [52] Janos M. Beer, High efficiency electric power generation: The environmental role, *Progress in Energy and Combustion Science* 2 (2007), 107-134.
- [53] *Combustion fossil power, Combustion engineering*, Windsor, Connecticut (1991).
- [54] A. B. Musa, X. Zeng, Q. Fang, H. Zhou, Numerical Simulation on Improving NO_x Reduction Efficiency of SNCR by Regulating the 3-D Temperature Field in a Furnace, *Advanced Materials Research*, 807-809 (2013) 1505–1513.
- [55] R. Holkar, O. D. Hebbal, CFD Analysis of Pulverised-Coal Combustion of Burner Used In Furnace with Different Radiation Models, *Journal of Mechanical and Civil Engineering* 2 (2013), 25-34.
- [56] L. Huang, Z. Li, R. Sun, J. Zhou, Numerical study on the effect of the Over-Fire-Air to the air flow and coal combustion in a 670 t/h wall-fired boiler, *Fuel Processing Technology* 87 (2006) 363-371.
- [57] E.H. Chui, H. Gao, A.J. Majeski, G.K. Lee, Performance improvement and reduction of emissions from coal-fired utility boilers in China, *Energy Sustain. Dev.* 14 (2010) 206-212.
- [58] L. I. Diez, Cristobal Cortesa, Antonio Campo, Modelling of pulverized coal boilers: review and validation of on-line simulation techniques, *Applied Thermal Engineering* 25 (2005) 1516-1533.
- [59] H.Y. Park, M. Faulkner, M.D. Turrell, P.J. Stopford, D.S. Kang, Coupled fluid dynamics and whole plant simulation of coal combustion in a tangentially fired boiler, *Fuel* 89 (2010) 2001-2010.
- [60] J. Yang, J. Kim, J. Hong, M. Kim, C. Ryu, Y. Kim, H. Park, S. Baek, Effects of detailed operating parameters on combustion in two 500-MW coal-fired boilers of an identical design, *Fuel* 144 (2015) 145–156..

- [61] Q. Zha, D. Li, C. Wanga, D. Che, Numerical evaluation of heat transfer and NO_x emissions under deep-air-staging conditions within a 600 MWe tangentially fired pulverized-coal boiler, *Applied Thermal Engineering* 116 (2017) 170–181.
- [62] H. Jo, K. Kang, J. Park, C. Ryu, H. Ahn, Y. Go Optimization of Air Distribution to Reduce NO_x Emission and Unburned Carbon for the Retrofit of a 500 MWe Tangential-Firing Coal Boiler, *Energies*, 2019.
- [63] B. Hernik, The impact of changes in the configuration of burners and OFA nozzles on the parameters of the OP-380 boiler furnace chamber, *Archivum Combustionis* Vol. 35 (2015) No 2.
- [64] Горан Ступар, Моделирање процеса у енергетском парном котлу са вишестепеним довођењем ваздуха по висини ложишта, докторска дисертација, Универзитет у Београду, Машински факултет, Београд, 2016. године.
- [65] Г. Ступар, Д. Туцаковић, Т. Живановић, М. Бањац, 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 редукцију 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), 2015. године (техничко решење).
- [66] G. Bakić, V. Šijački, M. Đukić, D. Tucaković, D. Stojiljković, B. Rajičić, G. Stupar, The possibility of fireside corrosion occurrence in domestic boilers furnaces with low NO_x combustion technology, CD-ROM Proceedings, ISBN: 978-86-7877-024-1, International Conference Power Plants 2014, Zlatibor, Serbia, October, 2014, E2014-039.
- [67] G. Stupar, D. Tucaković, T. Živanović, M. Banjac, S. Belosević, V. Beljanski, I. Tomanović, N. Crnomarković, M. Sijerčić, The Influence of Primary Measures for Reducing NO_x Emissions on Energy Steam Boiler Efficiency, Proceedings of the 25th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, ISBN 978-88-6655-322-9, ECOS 2012, Perugia, Italy, pp. 125/1-125/13.
- [68] Љ. Бркић, Т. Живановић, Д. Туцаковић, Термички прорачун парних котлова, Машински факултет Универзитета у Београду, Београд, Србија, 2006.

- [69] Љ. Бркић, Т. Живановић, Д. Туцаковић, Парни котлови, Машински факултет Универзитета у Београду, Београд, Србија, 2010.
- [70] Љ. Бркић, Т. Живановић, Д. Туцаковић, Аеродинамички прорачун парних котлова, Машински факултет Универзитета у Београду, Београд, Србија, 2006.
- [71] Н.В. Кузнецов, Митор В.В. Топловой расчет котельных агрегатов, нормативный метод, Энергия, Москва 1973.
- [72] D. Tucakovic, T. Zivanovic, V. Stevanovic, S. Belosevic, R. Galic, A computer code for the prediction of mill gases and hot air distribution between burners sections at the utility boiler, Appl. Therm. Eng. 28 (2008) 2178-2186.
- [73] D. Tucaković, G. Stupar, T. Živanović, M. Petrović, S. Belošević, Possibilities for reconstruction of existing steam boilers for the purpose of using exhaust gases from 14 MW or 17 MW gas turbine, Applied Thermal Engineering, Vol. 56, Issue 1-2, p. 83-90, 2013, IF(2012)=2.488, ISSN 1359-4311, DOI: 10.1016/j.applthermaleng. 2013.03.028.
- [74] Љ. Бркић, Прилог избору система сушења домаћих лигнита за котлове блокова велике снаге, докторска дисертација, Машински факултет Универзитета у Београду, Београд, 1980.
- [75] S. V. Patankar, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere, New York, (1980).
- [76] Ц. Црнојевић, Транспорт чврстих материјала флуидима, Машински факултет Универзитета у Београду, Београд, Србија, 2002.
- [77] V. Ivanović, T. Živanović, D. Tucaković, G. Stupar, Reconstruction of the aero-mixture channels of the pulverized coal plant of the 100 MW power plant unit, Thermal Science, 2011, vol. 15, No. 3, p. 663-676, IF(2011)=0.779, ISSN 0354-9836, DOI: 10.2298/TSCI1004120131.
- [78] Ж. Стевановић, Нумерички аспекти турбулентног преношења импулса и топлоте, Машински факултет, Универзитет у Нишу, Ниш, Србија, 2008.
- [79] B. E. Launder, D. B. Spalding, Lectures in Mathematical Models of Turbulence, Academic Press, London, England (1972).
- [80] D. E. Stock, Particle disperzion in Turbulent flow, Proceedings ICMF 95-Kyoto (1995), PL2-1-13.

- [81] C. Yin, S. Caillat, J. L. Harion, B. Baudoin, E. Perez, Investigation of the flow, combustion, heat-transfer and emissions from a 609 MW utility fired pulverized coal boiler, *Fuel* 81 (2002), 997-1006.
- [82] S. A. Morsi and A. J. Alexander, An Investigation of Particle Trajectories in Two-Phase Flow Systems, *J. Fluid Mech.* 55 (1972) 193-208.
- [83] S. Badzioch, P. G. W. Hawksley, Kinetics of Thermal Decomposition of Pulverized Coal Particles, *Ind. Eng. Chem. Process Design and Development*, 9 (1970) 521-530.
- [84] S. T. Thynell, Discrete-ordinates method in radiative heat transfer, *International Journal of Engineering Science* 36 (1998) 1651-1675.
- [85] M. Sakami, A. Charette, V. Le Dez, Radiative heat transfer in three-dimensional enclosures of complex geometry by using the discrete-ordinates method, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* 59 (1998), 117-136.
- [86] ANSYS FLUENT User's Guide, ANSYS, Inc, 2012, https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/main_pre.htm
- [87] J. Warnatz, NO_x Formation in High Temperature Processes, University of Stuttgart, Germany.
- [88] F. C. Lockwood, C. A. Romo-Millanes, Mathematical Modelling of Fuel - NO Emissions From PF Burners. *J. Int. Energy*, 65 (1992) 144-152.
- [89] G. Stupar, D. Tucaković, T. Živanović, S. Belošević, Assessing the impact of primary measures for NO_x reduction on the thermal power plant steam boiler, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 78, p. 397-409, 2015.
- [90] G. Stupar, D. Tucaković, T. Živanović, Ž. Stevanović, S. Belošević, Predicting effects of air staging application on existing coal-fired power steam boiler, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 149, p. 665-677, 2019.
- [91] 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_x reduction, CD-ROM Proceedings, International Conference Power Plants 2014, Zlatibor, Serbia, October, 2014, E2014-161.
- [92] Г. Ступар, Д. Туцаковић, Т. Живановић, С. Белошевић, Анализа утицаја примарног решења редукције NO_x на процесе у енергетском парном котлу блока Б1 ТЕ Костолац,

International Conference Power Plants 2016, ISBN: 978-86-7877-024-1, Златибор, Србија, Октобар, 2016.

[93] G. Stupar, D. Tucaković, T. Živanović, S. Belošević, N. Crnomarković, Air staging application effects on overall steam boiler operation, Thermal Science, vol. 23, Suppl. 5, pp. S1559-S1574, 2019.

[94] Г. Ступар, Нумерички прорачуни ложишта енергетских и индустријских парних котлова у циљу процене и визуелизације процеса и поља температуре, брзина и концентрација продуката сагоревања, предавање по позиву, Научно - стручна трибина Друштва термичара Србије, Машински факултет у Београду, <http://www.drustvo-termicara.com/dogadjaji/tribina-dts-kabinet-za-parne-kotlove-i-odeljenje-za-kotlove-u-okviru-katedre-za>, 2013.

[95] Г. Ступар, Нумеричка испитивања транспорта честица угља у млинском сепаратору и каналима аеросмеше, предавање по позиву, Научно - стручна трибина Друштва термичара Србије, Машински факултет у Београду, <http://www.drustvo-termicara.com/dogadjaji/tribina-dts-kabinet-za-parne-kotlove-i-odeljenje-za-kotlove-u-okviru-katedre-za>, 2013.

[96] Т. Живановић, Д. Туцаковић, Г. Ступар, Идејни пројекат адаптације постојећих млазних горионика угљеног праха котла К6 са потребним прорачунима – ТЕ Колубара А, Машински факултет у Београду, 2015.

[97] Д. Туцаковић, Т. Живановић, Г. Ступар, Контролни термички прорачун парног котла и CFD прорачун ложишта блокова 3, 4 и 5 у ТЕ НИКОЛА ТЕСЛА А, Машински факултет, Београд, 2016.

[98] Д. Туцаковић, Т. Живановић, Г. Ступар, Контролни прорачуни главних термоенергетских постројења, котловског и турбопостројења, у склопу пројектовања и изградње новог блока Б3 у ТЕ КОСТОЛАЦ, Машински факултет, Београд, 2018.

[99] Д. Туцаковић, Г. Ступар, Т. Живановић, Израда потребних прорачуна котловског постројења у ТЕ КОЛУБАРА Б, Машински факултет, Београд, 2019.

[100] D. Tucaković, T. Živanović, G. Stupar, Kontrolni termički proračun parnog kotla bloka 1 u TENT B sa CFD analizom za postojeći kotao i kotao nakon uvođenja primarnih mera – II faza modernizacije, Машински факултет, Београд, 2020.

[101] Т. Живановић, Д. Туцаковић, Г. Ступар, Контролни ЦФД прорачуни Сиенс-овог решења редукције NOx примарним мерама и утицај модернизације на температурске и хидрауличке процесе у циљу даље оптимизације рада парног котла блока Б1, Машински факултет у Београду, 2015.

[102] Д. Туцаковић, Т. Живановић, Г. Ступар, Идејно решење смањења концентрације азотних оксида (NO_x) примарним мерама за блока Б2 у ТЕКО, Машински факултет, Београд, 2016.

[103] Т. Живановић, Д. Туцаковић, Г. Ступар, Израда идејног решења и прорачуна смањења NO_x примарним решењем, Машински факултет у Београду, 2016.

[104] Д. Туцаковић, Г. Ступар, Т. Живановић, Контролни термички прорачун парног котла блока 2 у ТЕ Костолац Б, Пројектовање идејног решења за смањење садржаја азотних оксида применом комбинованих мера за парни котло блока 2 у ТЕ Костолац Б, Машински факултет, Београд, 2019.

МИШЉЕЊЕ РЕЦЕНЗЕНАТА

Монографија „Примарне мере редукције азотних оксида у ложишту парног котла” аутора др Горана Ступара представља оригинално научнотехничко дело у коме су приказани резултати од значаја за процену и анализу рада парног котла у коме се сагоревање врши са примарном мером вишестепеног довођења ваздуха по висини ложишта а која представља незаобилазан начин организације ефикасног сагоревања угљеног праха код савремених парних котлова који раде са мањом концентрацијом азотних оксида. Развијени поступци моделирања са допуњеном зоналном методом прорачуна, могу се успешно користити за решавање проблема, како код рада постојећих котлова односно њихових модификација, тако и код развоја и пројектовања нових постројења. Предлажем да се рад прихвати у статусу монографије и уврсти у издавачки план.

У Београду, 19.01.2021. године

Проф. др Драган Туцаковић

Машински факултет
Универзитет у Београду

Стратешки циљ ових истраживања је да допринесу испитивању могућности продужења радног века домаћих термоенергетских постројења, уз примену нових концепција организације сагоревања ради редукције азотних оксида у складу са све озбиљнијим еколошким нормама, уз унапређење ефикасности и сигурности рада постројења.

Са становишта савремености, оригиналности, оствареног научно-стручног доприноса и применљивости приказаних резултата, монографија представља вредно и оригинално научно дело, које обрађује веома сложену проблематику и изузетно актуелну тематику у областима термотехнике, енергетике, екологије и нумеричке механике флуида. Посебан квалитет монографије је што се првенствено заснива на резултатима сопствених истраживања аутора. Монографија може бити изузетно корисна студентима дипломских и постдипломских студија, као и свим стручњацима заинтересованим за ову сложену и код нас још недовољно афирмисану област истраживања и примене. Од значаја је како за научни рад и изучавање посматраних процеса, тако и за инжењерску праксу и испуњава све формалне услове (значај теме, обим текста, број референци по аутору) за монографско дело националног карактера.

Због свега наведеног, са задовољством предлажем Наставно-научном већу Машинског факултета Универзитета у Београду да ово оригинално научно дело прихвати као монографију националног значаја и уврсти у свој издавачки план.

У Београду, 19.01.2021. године

др Срђан Белошевић, научни саветник

Институт за нуклеарне науке „Винча” – Институт
од националног значаја за Републику Србију,
Универзитет у Београду

Проблематика загађења ваздуха и околине се са протеком времена и сталним растом емисија загађивача све више заоштрава. Учешће емисије азотних оксида у овом процесу није занемарљиво, јер су они веома опасни по здравље. Због тога је од интереса да се њихово учешће у димним гасовима парних котлова смањи током процеса сагоревања у ложишту. Једна од мера за то је зонално увођење секундарног ваздуха у горњи део ложишта. Увођење ваздуха на овом месту може да доведе до низа погоршања рада котла. Уколико се температура димних гасова прекомерно снизи доћи ће до снижења параметара произведене паре односно до смањења снаге постројења. При повећаном довођењу ваздуха у ове зоне доћи ће до повећања коефицијента вишка ваздуха на крају котла, то јест, до погоршања економичности котла. Само ова два разлога у потпуности афирмишу поступак прорачуна приказан у овој монографији, јер се паралелно са учешћем азотних оксида добијају и сви релевантни параметри рада котла. У том смислу, овај рад има велики значај за примену при пројектовању нових постројења, а нарочито при реконструкцији старих којих је у Србији приличан број.

Имајући у виду изложено, предлажем да се монографија „Примарне мере редукције азотних оксида у ложишту парног котла”, аутора др Горан Ступара прихвати и преда на штампу.

У Београду, 25.01.2021. године

др Љубиша Бркић, редовни професор у пензији

Машински факултет
Универзитет у Београду