

АНАЛИЗА УТИЦАЈА ПРИМАРНОГ РЕШЕЊА РЕДУКЦИЈЕ NO_x НА ПРОЦЕСЕ У ПАРНОМ КОТЛУ К-3 У ТЕ-ТО НОВИ САД

Горан Ступар^{*а}, Драган Туцаковић^{*}, Огњен Стаменковић^{*}, Слободан Стевановић^{**}

** Машински факултет, Универзитет у Београду, Краљице Марије 16,
11120 Београд, Србија^а (381-11) 3370-373, gstupar@mas.bg.ac.rs*

*** Термоелектрана–топлана Нови Сад, Панонске термоелектране-топлане,
21000 Нови Сад, Србија (381-21) 661-6522*

АБСТРАКТ: Пооштрени прописи у погледу емисије штетних гасова у околину, које ће се примењивати у наредном периоду, намећу увођење примарних мера редукције азотних оксида које подразумевају модификацију процеса сагоревања у ложишту парног котла К-3 у ТЕ-ТО Нови Сад. Законске мере при сагоревању природног гаса у парним котловима велике снаге прописују максимални садржај азотних оксида од 200 mg/Nm³ у сувим димним гасовима при садржају кисеоника од 3 %. Сходно томе је у ТЕ-ТО Нови Сад испитано увођење примарних мера редукције азотних оксида. Како услед модификације система сагоревања може доћи до промене топлотног оптерећења испаривача смештеног у ложишту у раду је приказана провера рада парног котла при новој организацији процеса сагоревања. Ради анализе ефеката модернизације на рад парног котла у целини, извршено је прорачунско спрезање диференцијалних математичких модела процеса сагоревања природног гаса, струјања, зрачења продуката сагоревања и настајања азотних оксида са интегралним термичким прорачунским процедурама. Овакав прорачунски систем омогућава поуздано предвиђање радних карактеристика парног котла у условима подстехиометријског сагоревања и сагоревања са рецикулацијом хладних продуката сагоревања са краја котла, а његовом применом квалитет рада самог котла могуће је проценити са аспекта ефективног, ефикасног, сигурног и еколошки прихватљивог начина рада. На овакав начин омогућено је формирање свеобухватног описа погонског режима парног котла. На основу наведеног извршени су прорачуни парног котла ТЕ-ТО Нови Сад за постојећи и реорганизовани систем сагоревања. У раду је приказана анализа утицаја већег броја параметара на рад парног котла са различитим примарним мерама. Приказани систем прорачуна за рад котла је верификован мерењем извршеним на предметном објекту.

Кључне речи: парни котлао, примарне мере, систем прорачуна, ефикасност.

IMPACT ANALYSIS OF PRIMARY MEASURES REDUCTION OF NO_x PROCESSES IN STEAM BOILER K-3 OF COMBINED HEAT AND POWER PLANT NOVI SAD

Goran Stupar^{*а}, Dragan Tucaković^{*}, Ognjen Stamenković^{*}, Slobodan Stevanović^{**}

** Faculty of Mechanical Engineering, University of Belgrade,
Kraljice Marije 16, 11120 Belgrade 35, Serbia^а (381-11) 3370-373, gstupar@mas.bg.ac.rs*

*** Combined heat and power plant Novi Sad, Panonske termoelektrane-toplane,
21000 Novi Sad, Srbija (381-21) 661-6522*

ABSTRACT: Stricter regulations regarding the emission of harmful gases into the environment, which are to be applied in the coming period, impose the introduction of primary nitrogen oxide reduction measures, implying a modification of the combustion process in the steam boiler K-3 in CHP Novi Sad. Legislative measures prescribe a maximum content of nitrogen oxides of 200 mg/Nm³ in dry flue gases with an oxygen content of 3% for the combustion of natural gas in steam boilers high units. Consequently, the introduction of primary measures of nitrogen oxide reduction was examined in CHP Novi Sad. Considering that the modification of the combustion system may lead to the change of the thermal load of the evaporator located in the furnace, the paper presents an audit of the operation of the steam boiler during the new organization of the combustion process. In order to analyze the effects of modernization on the work of the steam boiler as a whole, an estimative coupling of differential mathematical models of burning natural gas, flow, radiation of combustion products and the formation of nitrogen oxides with integral thermal calculation procedures. This calculation system enables reliable prediction of the working characteristics of the steam boiler in the conditions of substoichiometric combustion and combustion with cold recirculation of combustion products from the boiler exit, and its application helps assess the quality of the boiler in terms of how effective, efficient, safe and environmentally friendly its operating mode is. This enables the formation of a comprehensive description of the steam boiler propulsion mode. Based on the above, calculations of the CHP Novi Sad steam boiler have been performed both for the existing and the reorganized combustion system. The work shows an analysis of the impact of more parameters on the work of the steam boiler with different primary measures. The display

Key words: steam boiler, primary measures, calculation system, efficiency.

1. УВОД

Поштрени прописи у погледу емисије штетних гасова у околину, који ће се примењивати у наредном периоду, намећу увођење примарних мера редукације азотних оксида у ложишту парног котла К-3 у ТЕ-ТО Нови Сад. Примена *Уредбе о граничним вредностима емисија загађујућих материја у ваздух из постројења за сагоревање*, при сагоревању природног гаса у парним котловима велике снаге, прописују максимални садржај азотних оксида од 200 mg/Nm³ [1] у сувим димним гасовима при садржају кисеоника од 3 %. Сходно томе је у ТЕ-ТО Нови Сад испитано увођење различитих поступака примарних мера редукације азотних оксида. Како поједине материје које настају процесом сагоревања фосилних горива имају негативан утицај на човека и природу у целини, неопходно је додатно организовати и прилагодити процесе у парним котловима. Азотни оксиди приликом сагоревања природног гаса у највећој мери настају при високим локалним температурама, оксидацијом азота из ваздуха (термички NO_x). Како је, при сагоревању природног гаса, формирање највећег дела NO_x првенствено зависно од зона високе температуре [2] неопходно је управљати процесима у парном котлу како би се и са овог аспекта остварили повољни услови рада. За постизање еколошких стандарда у овом домену развијене су различите методе за смањење садржаја створених оксида азота у димним гасовима. У прву групу спадају примарне методе за редукацију 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 [3]. Овакви примарни поступци постају незаобилазан вид организације рада ложишта енергетских парних котлова приликом сагоревања а предмет испитивања у овом раду су ограничења која се могу постићи применом само примарних поступака и њихов утицај на ефективност и ефикасност самога постројења. При сагоревању природног гаса предвиђа се да је могуће

приблизити се или у потпуности задовољити норме у области жељеног нивоа концентрације NO_x само примарним поступцима. Како је у ложишту неопходно створити окружење које нема широке зоне локално високих температура, односно водити процес тако да се сниже високе температуре које се постижу сагоревањем угљоводоника, најпримењивија мера ове групације је рецикулација хладних продуката сагоревања.

У циљу испитивања могућности примене појединих примарних мера редукције азотних оксида као и анализе њихових ефеката на рад парног котла у целини, извршено је моделирање процеса сагоревања природног гаса у ложишту парног котла К-3 у ТЕ-ТО Нови Сад. Свеобухватни опис процеса у ложишту енергетског парног котла за сагоревање гасовитог горива дефинисан је математичким моделом зрачећег реактивног турбулентног тока заједно са подмоделом формирања термичких оксида азота. Овакав сложени математички модел повезан је са процедуром термичког прорачуна у јединствени рачунски систем за анализу рада парног котла у целини. Дефинисани систем омогућава прорачуне са променом утицајних параметара у најширим границама. На оваквој бази извршени су прорачуни парног котла за пројектни и након извршене модернизације реорганизовани систем сагоревања, а у циљу оцене квалитета његовог рада.

Промена настале у раду разматраног парног котла након уведених примарних мера приказани су релевантним резултатима система прорачуна у случају промене места и стања ваздуха за сагоревање, као и различитих коефицијената рецикулације продуката сагоревања а за гориво које се тренутно користи у електрани.

2. ТЕХНИЧКИ ОПИС ПАРНОГ КОТЛА

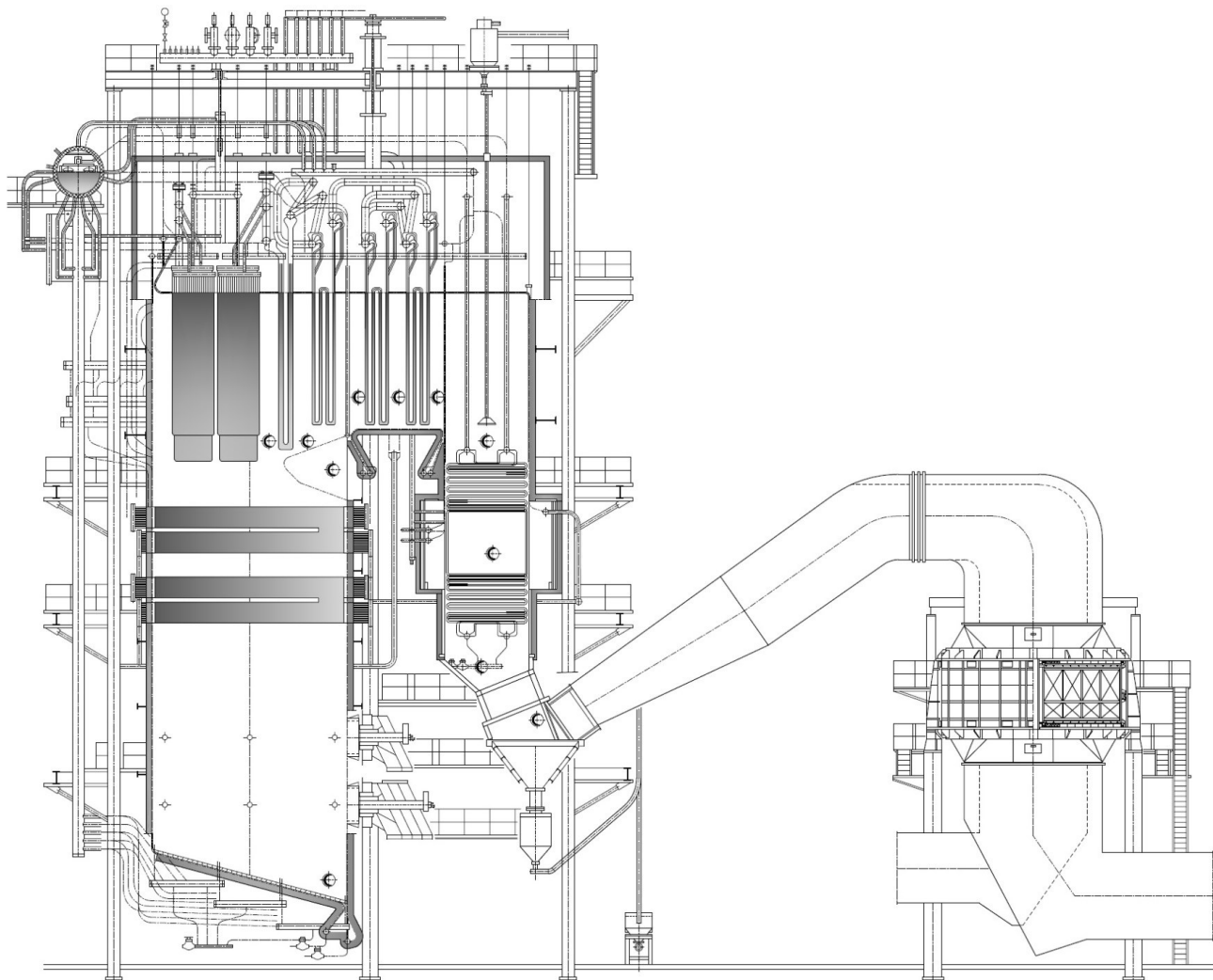
Парни котло К-3 у ТЕ-ТО Нови Сад је стрмоцевни са природном циркулацијом у испаривачу и сагоревањем природног гаса а састоји се од загрејача ваздуха и воде, озраченог испаривача, озраченог и полуозрачених прегрејача паре, као и четири ступња конвективних прегрејача паре.

Радне карактеристике парног котла:

Максимална продукција паре	$D = 138,9 \text{ kg/s}$
Максимална топлотна снага	$P = 350 \text{ MW}$
Притисак прегрејане паре	$p_s = 14,0 \text{ MPa}$
Температура прегрејане паре	$t_s = 560 \text{ }^\circ\text{C}$
Притисак у добошу котла	$p_k = 15,9 \text{ MPa}$
Температура кључања	$t_k = 346,8 \text{ }^\circ\text{C}$
Температура напојне воде	$t_{mv} = 230 \text{ }^\circ\text{C}$

Ложиште је израђено од гасно непропусних цевних мембранских панела. Задњи ложишни зид, на коме су постављени горионици, у горњем делу формира гребен за наструјавање који представља почетак хоризонталног гасног међуканала. У ложишту котла су непосредно испод гребена за наструјавање постављени озрачени прегрејачи паре, а на његовом излазу налази се полуозрачени прегрејач паре. Након полуозраченог прегрејача паре продукти сагоревања скрећу у хоризонтални гасни међуканал. У хоризонталном гасном међуканалу продукти сагоревања наструјавају конвективне прегрејаче паре 1 и 2 а затим цевну решетку 1, након чега димни гасови наструјавају излазни конвективни прегрејач паре 4, конвективни прегрејач паре 3 и цевну решетку 2. Хоризонтални гасни међуканал је по плафону екранисан прегрејачким цевним панелима. По бочним зидовима и поду, до прве цевне решетке, међуканал је екранисан испаривачким цевним панелима. Између две цевне решетке, по бочним зидовима и поду, међуканал је екранисан прегрејачким цевним панелима.

На слици 1 приказан је предметни парни котло.



Слика 1. Парни котло К-3 у ТЕ – ТО Нови Сад;

После цевне решетке 2 продукти сагоревања доспевају у скретну комору где улазе у вертикални конвективни гасни канал. У скретној комори се налазе носеће и преструјне цеви другог ступња загрејача воде којима се загрејана вода одводи у добош котла. Комора је екранисана по плафону и зидовима прегрејачким мембранским цевним панелима. Прегрејачки панели, постављени по зидовима коморе, залазе и у вертикални конвективни гасни канал све до места где је постављен други ступањ загрејача воде. Доњи део вертикалног канала, где је постављен први ступањ загрејача воде, није екранисан. Након загрејача воде продукти сагоревања се лименим каналима доводе до два регенеративна ротациона загрејача ваздуха након чега се продукти сагоревања хладе до коначне излазне температуре и одводе у атмосферу посредством димњака.

Потребно је нагласити да након модернизације нема промена на цевном систему главног топлотног пријемника вода-водена пара. Промене настале увођењем испитиваних примарних мера огледају се у начину допремања загрејаног ваздуха и увођења рецикулације продукта сагоревања. Увођење ваздуха за догоревање (ВЗД) је у области испод озраченог прегрејача паре, а испитани су радни случајеви са увођењем загрејаног, хладног и мешавине ваздуха са рецикулисаним продукцима сагоревања.

Систем ВЗД (ОФА) млазница се састоји од четири млазнице које су постављене изнад горионика на задњем зиду ложишта.

3. РЕЗУЛТАТИ И СИСТЕМА ПРОРАЧУНА ПАРНОГ КОТЛА

3.1. Систем прорачуна парног котла

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 анализира [4-5].

Путем нумеричке симулације решавају се једначине стационарног турбулентног зрачећег тока (количине кретања, одржања масе, енергије и концентрације гасовитих компонената, моделирања турбуленције, хемијских реакција и топлотног процеса који се доминантно одвија механизмом зрачења), само у домену где почиње и завршава се процес сагоревања. Овакви тродимензијски прорачуни спроводе се комерцијалним пакетом рачунарске механике флуида (CFD) ANSYS Fluent, који као излазне величине даје како величине стања реагујућих гасовитих компонената тако и апсорбоване количине топлоте по границама домена. На овакав начин постављен математички модел обухвата процесе у ложишту при сагоревању гасовитог горива, дефинише зрачећи реактивни турбулентни ток и пружа детаљан опис комплексних спрегнутих процеса. У укупни модел реактивног турбулентног гасног тока укључен је математички подмодел стварања термичких NO_x . На овај начин дефинисан модел омогућава прорачуне са променом утицајних параметара (кофицијента вишка ваздуха, оптерећења котла, расподеле ваздуха и горива, рецикулације гасова) у најширим границама.

Термички NO_x је основни извор формирања NO_x при сагоревању гасовитих горива и горива која не садрже органски везан азот. Параметри који утичу на концентрацију кисеоника у зони пламена или температуру у зони пламена утицаће и на концентрацију термичког NO_x . У најважније параметре који утичу на брзину образовања азот-моноксида термичким механизмом спадају максимална температура сагоревања, температура ваздуха, стварна количина ваздуха, састав горива, концентрација азота, температура зидова ложишта као и време трајања процеса.

Након конвергенције решења, излазни резултати по методи рачунарске механике флуида, као одзив елемента (ложишта) на побуду од стране система, пореде се са локалним параметрима усвојеним у прорачунском кораку који је претходио овој нумеричкој фази, а заснованим на стандардним интегралним процедурама [6]. Уколико није дошло до подударана предвиђеног стања струје димних гасова на излазу из ложишта и енергије која им је при томе одузета, односно апсорбована од стране испаривачких и прегрејачких панела на зидовима ложишта, процедура се понавља до задовољавања жељеног критеријума. Након више пролаза кроз овакав систем долази се до свеобухватног решења рада постројења које је описано стањима, количинама и енергетским учинком свих токова по карактеристичним позицијама свих грејних површина енергетског парног котла. Спровођење приказане процедуре подразумева постојање решења термичког прорачуна котла и нумеричког прорачуна ложишта котла. На овај начин, синергијски дефинисан систем омогућава праћење рада сложеног енергетског система у свим његовим елементима и обезбеђује подлогу за испитивање мера које утичу на његову жељену функционалност.

3.2. Резултати система прорачуна котла

На основу дефинисаног модела прорачуна извршена су испитивања рада реконструисаног (Р) парног котла при номиналном оптерећењу (100 %) за природни гас који се тренутно користи у електрани, доње топлотне моћи од 36700 kJ/kg, елементарне анализе природног гаса [7] дате у табели 1. На основу наведеног израђен је модел за контролни CFD прорачун ложишта парног котла за постојећи, пројектни систем сагоревања. Домен прорачуна је проширен на полуозрачени прегрејач паре, по току продуката сагоревања, непосредно иза ложишта.

Табела 1. Елементарни састав природног гаса

Назив	Ознака	Јединица мере	Вредност
Метан	CH ₄	%	95,15
Угљен-диоксид	CO ₂	%	0,57
Водоник	H ₂	%	-
Азот	N ₂	%	0,88
Угљен-моноксид	CO	%	-
Етан	C ₂ H ₆	%	2,40
Пропан	C ₃ H ₈	%	0,72
Бутан	C ₄ H ₁₀	%	0,22
Пентан	C ₅ H ₁₂	%	0,04
Хексан	C ₆ H ₁₄	%	0,02

Геометријске карактеристике ложишта, које обухвата испаривач и оба озрачена прегрејача паре, као и карактеристике полуозраченог прегрејача паре одређене су на основу расположиве техничке документације [8] а као гранични услови за решавање система једначина којима се описују процеси у посматраном домену коришћени су резултати топлотног биланса и термичког прорачуна котла. Како се при сагоревању природног гаса, код постојећег система сагоревања, не користи рецикулација димних гасова улазни подаци за контролни CFD прорачун разматраног домена састоје се од масених протока природног гаса и загрејаног ваздуха који се доводе у осам вртложних горионика.

Да би се, при раду котла са постојећим горионцима, испитао утицај увођења рецикулације хладних димних гасова и двостепеног довођења ваздуха за сагоревање на смањење садржаја азотних оксида али и на рад парног котла у целини спроведени су допунски прорачуни по описаном алгоритму. Како је код разматраног парног котла, при његовом раду са мазутом, већ предвиђена могућност коришћења рецикулације хладних димних гасова, на начин што се део димних гасова одузима испред загрејача ваздуха и одводи, испред горионика, у канале загрејаног ваздуха оваква шема рецикулације је задржана у испитиваним тест случајевима. На овај начин се у горионике доводи мешавина загрејаног ваздуха и рецикулисаних димних гасова чије су температуре блиске. Оваква рецикулација димних гасова је за предметни парни котао испитивана као најзначајнија примарна мера редукације азотних оксида. Приказаним прорачунима испитан је различит проток рецикулације димних гасова, који се као мешавина уводи кроз ВЗД отворе на задњем зиду котла, у количинама од 5 %, 10 % и 15 % протока димних гасова који настављају кроз загрејач ваздуха. Оваква шема функционисања предвиђа да се мешавина ваздуха и рецикулисаних гасова уведе и у горионик и у отворе ВЗД а како би се задржале пројектне брзине у горионику усвоја се да је проток мешавине која се уводи у ВЗД отворе једнак протоку рецикулисаних димних гасова. Поред наведеног допунски је испитан и рад парног котла у комбинацији са загрејаним и хладним ваздухом где се у ВЗД отворе доводи само ваздух у количини рецикулисаних димних гасова од 10 %. Како допунски случај испитан је и допринос нових нискоемисионих вртложних горионика у комбинацији са рецикулацијом од 10 %.

Вишестепено довођење ваздуха у ложиште подразумева постављање додатних отвора изнад горионика, ВЗД млазница, кроз које се доводи ваздух за догоревање. Оваквом расподелом ваздуха се у зони горионика остварује подстехиометријско сагоревање а касније, довођењем преосталог ваздуха кроз систем ВЗД млазница, долази до потпуног сагоревања природног гаса. На овај начин могуће је постићи нешто повољније температурске услове у ложишту који доприносе даљем смањењу садржаја азотних оксида у процесу сагоревања.

Валидација модела је извршена за рад котла при поројектном стању (НР), то јест, при конвенционалном сагоревању без примарних мера за смањење садржаја азотних оксида у продуктима сагоревања. Изводи из топлотног биланса и термичког прорачуна разматраних тест случаја приказани су у табелама 2 и 3.

Табела 2. Изводи система прорачуна котла

Редни број	НАЗИВ	Ознака	Јединица мере	Доња топлотна моћ горива H_d [kJ/kg]						
				36700						
				НР	Р					
					заг.ваз. 10 %	хл.ваз. 10 %	меш. 5 %	меш. 10 %	меш. 15 %	меш. 10 % + НГ
Оптерећење котла 100 [%]										
1.	Коефицијент вишка ваздуха у горионику	α_{gor}	-	1,05	0,938	0,938	0,997	0,949	0,905	0,949
2.	Однос количине ваздуха кроз ВЗД млазнице и теоријске количине	$\Delta\alpha_{vzd}$	-	0	0,112	0,112	0,053	0,101	0,145	0,101
3.	Коефицијент вишка ваздуха на излазу из ложишта	α_l''	-	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05
4.	Температура загрејаног ваздуха	t_{zv}	°C	276	286	299	282	286	290	286
5.	Коефицијент вишка ваздуха на излазу из котла	α_{iz}	-	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14
6.	Температура излазних димних гасова	t_{iz}	°C	100	102	115	102	102	101	102
7.	Губитак у излазним гасовима	q_2	%	3,99	4,08	4,73	4,06	4,07	4,04	4,07
8.	Степен корисности котла	η_k	%	93,45	93,30	92,57	93,34	93,31	93,31	93,31
9.	Продукција прегрејане паре	D	kg/s	138,9	138,9	138,9	138,9	138,9	138,9	138,9
10.	Температура прегрејане паре на излазу из котла	t_s	°C	555	555	555	555	555	555	555
11.	Притисак прегрејане паре на излазу из котла	p_s	bar	138	138	138	138	138	138	138
12.	Температура напојне воде	t_{nv}	°C	230	230	230	230	230	230	230
13.	Потрошња горива	B	Nm ³ /s	10,591	10,608	10,692	10,603	10,607	10,607	10,607
14.	Садржај угљен-монооксида	CO	mg/Nm ³	0	56	70	1	37	96	29
15.	Садржај азотних оксида	NO _x	mg/Nm ³	829	191	188	384	217	112	178

Табела 3. Изводи термичког прорачуна котла потребних за анализу

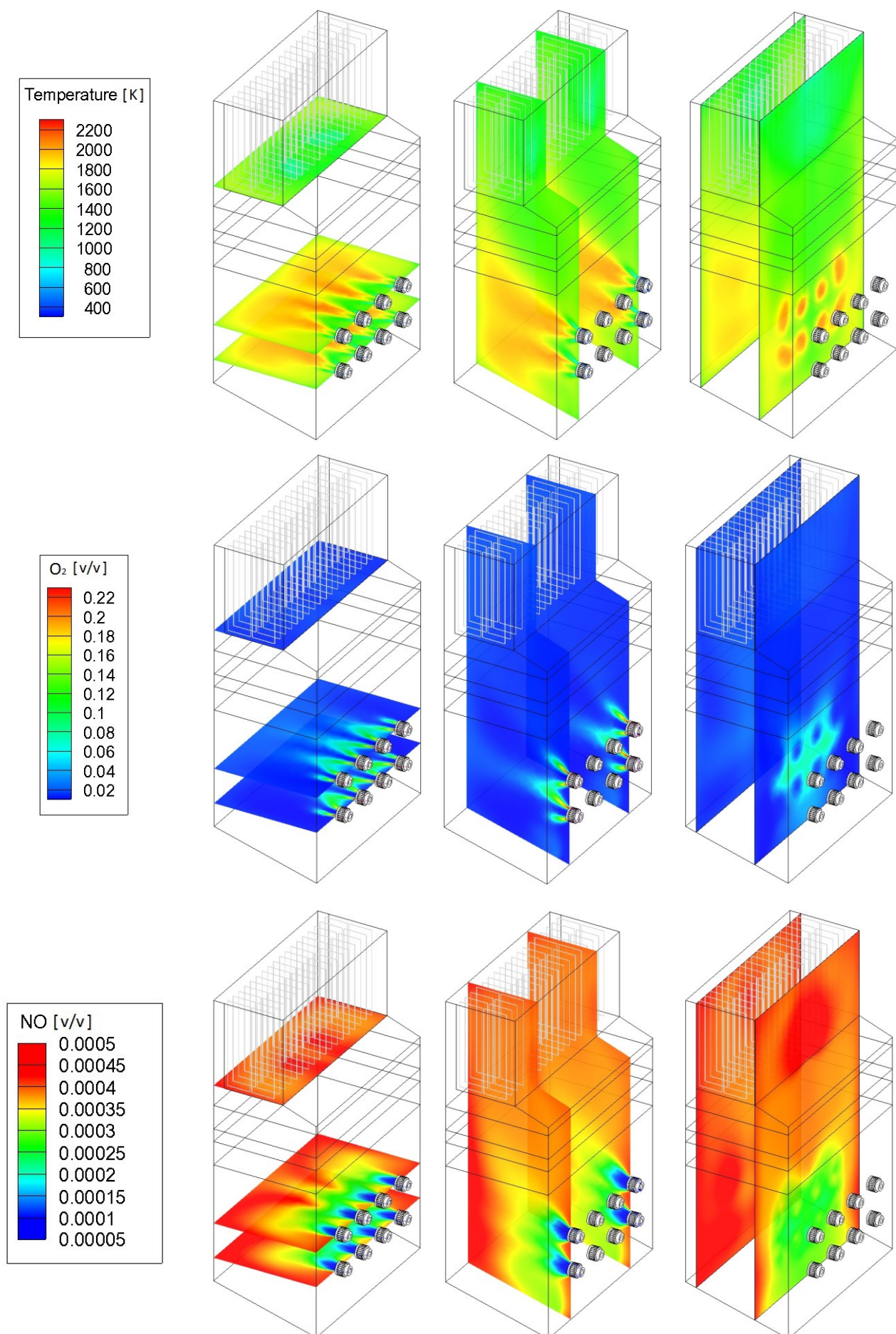
Редни број	НАЗИВ	Ознака	Јединица мере	Доња топлотна моћ горива H_d [kJ/kg]						
				36700						
				НР	Р					
					заг.ваз. 10 %	хл.ваз. 10 %	меш. 5 %	меш. 10 %	меш. 15 %	меш. 10 % + НГ
Оптерећење котла 100 [%]										
Топлотни пријемник (водена пара)										
1.	Убризгавање у хладњак број 1	D_{H1}	kg/s	7,249	9,535	9,933	8,427	9,407	10,695	9,407
2.	Убризгавање у хладњак број 2	D_{H2}	kg/s	10,270	13,508	14,072	11,938	13,326	15,152	13,326
3.	Убризгавање у хладњак број 3	D_{H3}	kg/s	2,618	3,443	3,587	3,043	3,397	3,862	3,397
4.	Температура паре на улазу у полуозрачени прегрејач паре	t_{popul}	°C	357	354	354	356	355	354	354
5.	Температура паре на излазу из полуозраченог прегрејача паре	t_{popiz}	°C	448	450	450	449	449	448	449
6.	Температура паре на улазу у конвективни прегрејач паре 4	t_{kpp4ul}	°C	520	516	515	518	516	515	516
7.	Температура паре на излазу из конвективног прегрејача паре 4	t_s	°C	555	555	555	555	555	555	555
Топлотни предајник (димни гасови)										

8.	Температура на креју ложишта	t''_l	°C	1261	1252	1255	1257	1250	1248	1250
9.	Температура иза полуозраченог прегрејача паре	t_{g1}	°C	1007	1013	1016	1011	1012	1017	1012
10.	Температура иза конвективног прегрејача паре 1	t_{g2}	°C	932	941	944	937	940	947	940
11.	Температура иза конвективног прегрејача паре 2	t_{g3}	°C	815	826	828	821	825	832	825
12.	Температура иза цевне решетке 1 - испаривач	t_{g4}	°C	807	818	820	813	817	824	817
13.	Температура иза конвективног прегрејача паре 4	t_{g5}	°C	734	745	746	739	744	750	744
14.	Температура иза конвективног прегрејача паре 3	t_{g6}	°C	678	688	690	683	688	693	688
15.	Температура иза цевне решетке 2 - прегрејач	t_{g7}	°C	667	677	679	672	677	682	677
16.	Температура иза скретне коморе	t_{g8}	°C	652	662	664	657	662	668	662
17.	Температура иза другог ступња загрејача воде	t_{g9}	°C	439	455	457	448	455	462	455
18.	Температура иза првог ступња загрејача воде	t_{g10}	°C	341	355	357	348	355	363	355
19.	Температура иза загрејача ваздуха – излаз из котла	t_{iz}	°C	100	102	115	102	102	101	102

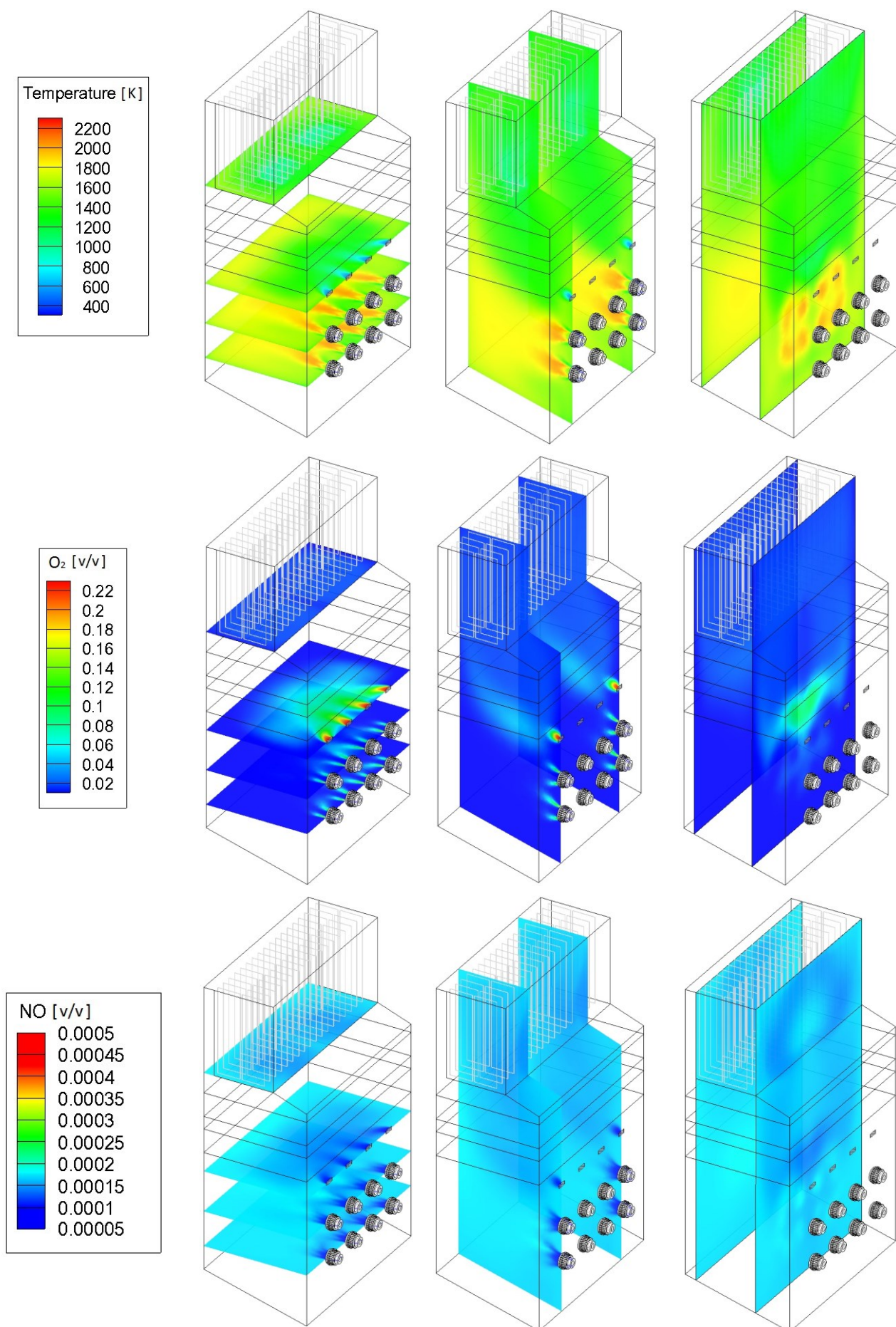
3.3. Анализа резултата система прорачуна котла

На слици 2. приказана су како температурска тако и поља концентрације кисеоника и азотних оксида у карактеристичним вертикалним и хоризонталним пресецима прорачунског домена за рад котла при оптерећењу од 100 % и пројектном систему сагоревања. Приказани случајеви подразумевају рад котла са свих 8 горионика у раду. Лако се могу уочити широке зоне највиших температура у нивоу горионика које достижу локалне вредности и преко 2050 °C. Приказано поље јасно сугерише пад температура продуката сагоревања по висини услед интензивног топлотног флуksа ка грејним површинама на границама ложишта. Међуим, и поред тога, анализом приказаног температурског поља, јасно се може приметити да се у највећем делу ложишта јављају високе температуре продуката сагоревања (изнад 1400 °C), што представља погодну средину за формирање азот-мооксида термичким механизмом, а последица је сагоревања висококалоричних угљоводоника. Такође, може се уочити да се као поселдица организације процеса са вишком ваздуха од 5 % у горионику он у највећој мери завршава већ у средишњем делу ложишта. Потребно је нагласити да додатно неповољан утицај представља изолациони слој на поду ложишта који је, смањујући предату количину топлоте екранима испаривача на поду, допунски повисио температуру продуката сагоревања у зони испод горионика. На приказаном пољу концентрације кисеоника може се приметити његово интензивно трошење у тачкама највиших температура у којима се одвија највећи део процеса сагоревања. Повећане концентрације кисеоника јављају се, насупрот горионика, у области предњег зида ложишта где се иницијални процес сагоревања успорава као и у излазним зонама ложишта, као последица мешања са вишком ваздуха а где је сагоревање већ увелико завршно. Поље концентрације азот-мооксида показује да се највеће количине формирају у областима изван главне зоне сагоревања а израженије у зонама виших температура, пре свега уз предњи зид ложишта.

На слици 3. приказана су поља температура, кисеоника и азот-мооксида за реорганизовани систем сагоревања и рад са мешавином загрејаног ваздуха и 10 % рециркулисаних продуката сагоревања уз рад са новим нискоемисионим горионцима. Приказана поља јасно сугеришу да су максималне вредности температуре продуката сагоревања ниже него пре увођења примарних мера а као последица, пре свега, рецикулације дела продуката сагоревања. Такође се лако може приметити пад температуре продуката сагоревања по висини ложишта уз присуство широке зоне њиховог интензивног



Слика 2. Поље T, O₂ и NO у ложишту са пројектним системом сагоревања (НР);

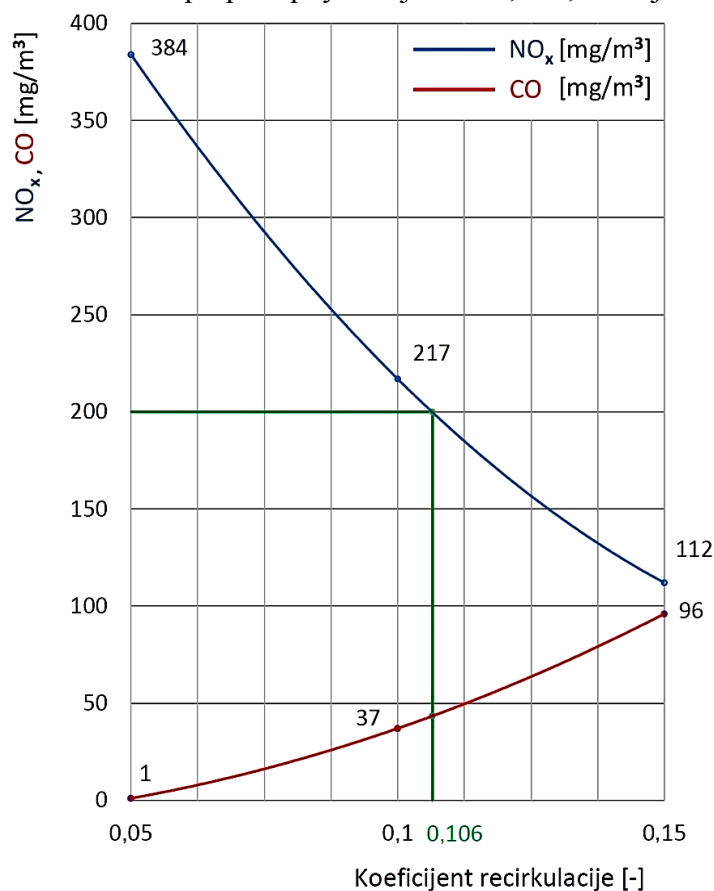


Слика 3. Поље T, O₂ и NO у ложишту са реорганизованим системом сагоревања и НГ (P);

хлађења на месту увођења дела мешавине кроз ВЗД млазнице. Овакво температурско поље у ложишту уз део кисеоника који је из зоне температурских пикова представља непогодну средину за формирање веће количине азот-моноксида, па је њихов излазни садржај значајно мањи. На приказаном пољу концентрације кисеоника лако се могу уочити зоне веће концентрације у области ВЗД млазница. Поље кисеоника указује и на то да је његово значајније трошење у нивоу горионика у којем се, без обзира на подстехиометрију, одвија највећи део процеса сагоревања. Поље концентрације азот-моноксида показује да се највеће количине формирају у областима главне зоне сагоревања где су температуре највише али које су у модификованој концепцији сагоревања појављују у ужим зонама и недовољно су високе да настану његове веће количине.

За постојећи систем сагоревања при максималном оптерећењу котла прорачунска средња концентрација азотних оксида износи 829 mg/Nm^3 а како су измерене концентрације на нивоу од 850 mg/Nm^3 приказани модел може се сматрати валидним у погледу процене концентрације азотних оксида.

Приликом приказане анализе испитана је модификација система сагоревања увођењем само рецикулације димних гасова као и њихове комбинације са двостепеним довођењем ваздуха применом система ВЗД млазница при раду са постојећим горионцима и максималном оптерећењу котла. Средња прорачунска концентрација азотних оксида у случају коришћења само рецикулације димних гасова, у количини од 10 %, износи 273 mg/Nm^3 . Додатком система ВЗД млазница, тако да се кроз њих доводи мешавина загрејаног ваздуха и рециркулисаних димних гасова, концентрација азотних оксида износи 217 mg/Nm^3 . Како је увођење система ВЗД млазница концентрација азотних оксида смањила за приближно 20 % ова мера се сматра оправданом. Коришћењем мешавине ваздуха и гасова кроз систем ВЗД млазница, прописана гранична вредност емисије азотних оксида од 200 mg/Nm^3 може се постићи при рецикулацији од 10,6 %, како је то показано на слици 4.



Слика 4. Промена садржаја азотних оксида и угљен-моноксида у димним гасовима у зависности од коефицијента рецикулације при раду котла са ВЗД млазницама и постојећим горионцима за рад котла при оптерећењу од 100 %

Како је од стране произвођача горионика препоручена вредност рецикулације димних гасова до 12 % могуће је повећањем рецикулације продуката сагоревања додатно смањити садржај азотних оксида у димним гасовима па нови горионици нису неопходни.

Прорачуни су такође показали да примена само нових горионика, без осталих примарних мера, доводи до смањена садржаја азотних оксида са вредности 829 mg/Nm^3 на вредност 713 mg/Nm^3 што је далеко изнад граничне вредности емисије од 200 mg/Nm^3 . У циљу даљег смањења садржаја азотних оксида испитана је и већ описана модификација система сагоревања при раду са новим горионицима и максималном оптерећењу котла. Средња прорачунска концентрација азотних оксида у случају коришћења само рецикулације димних гасова, у количини од 10 %, износи 239 mg/Nm^3 што представља смањење од око 66 %. Додатком система ВЗД млазница, у којима се као радни флуид користи мешавина ваздуха и гасова, концентрација азотних оксида износи 178 mg/Nm^3 , што представља додатно смањење за приближно 25 % тако да је ова примарна мера задржана и у случају рада котла са новим горионицима.

Потребно је истаћи да је утицај описане модификације система сагоревања на рад котла у целини веома мали и да се за сваки разматрани тест случај постижу пројектни параметри рада уз приближан ниво убризгавања у систему регулације температуре прегрејане паре а чије су промене резултат увођења рецикулације продуката сагоревања.

Анализом приказаних радних режима може се приметити да је као последица примене нове организације сагоревања дошло до благих промена температуре продуката сагоревања на излазу из ложишта у односу на постојећи систем сагоревања. Овакав тренд благог одступања од температура продуката сагоревања задржан је иза свих грејних површина што је за последицу има незнатног смањење ефикасности рада котла. Допунски се може констатовати да, због повећаног протока продуката сагоревања кроз котлао, конвективне грејне површине примају нешто већу количину топлоте тако да је укупан проток сопственог кондензата, који се убризгава у хладњаке паре, повећан од 20 % до 30 % а у зависности од степена рецикулације.

Радни режим који подразумева увођење хладног ваздуха у систем ВЗД млазница представља изузетак. Како се хладан ваздух за систем ВЗД млазница се одузима испред загрејача ваздуха тако да је проток ваздуха кроз загрејач умањен за ту количину. Из тог разлога температура загрејаног ваздуха се повисила са $286 \text{ }^\circ\text{C}$ на $300 \text{ }^\circ\text{C}$ а температура димног гаса на излазу из котла са $102 \text{ }^\circ\text{C}$ на $115 \text{ }^\circ\text{C}$. Оваква промена доводи до повећања губитка у излазним гасовима а у крајњем и до смањења степена корисности котла са 93,31 % на 92,57 %, што овај радни режим чини најнеповољнијим.

Анализом рада постројења са енергетског аспекта наглашава се да је услед задржавања пројектних вредности коефицијента вишка ваздуха нема већих одступања степена корисности. Одступања су резултат увођења рецикулације а највећи пад је у тест случају када се у ВЗД отворе уводи хладан ваздух што је довело до повећања потрошње природног гаса са $10,591 \text{ Nm}^3/\text{s}$ на $10,692 \text{ Nm}^3/\text{s}$. Додатно се може констатовати да степен корисности у осталим радним режимима опада благо и да у тест режимима који задовољавају са еколошког аспекта рада степен корисности се задржава на нивоу од 93,31 % уз потрошњу од $10,607 \text{ Nm}^3/\text{s}$.

4. ЗАКЉУЧЦИ

У раду су приказани резултати система прорачуна који су вршени у циљу анализе рада котла у целини са модификованим системом сагоревања у циљу снижавања концентрације азотних оксида у продуктима сагоревања.

Извршени прорачуни показали су да модификовани систем у свим испитиваним погонским ситуацијама обезбеђује нешто мање ефикасан рад постројења као последицу рада са рецикулисаним продуктима сагоревања. Такође, у погледу сигурности прорачуни су показали да се код свих испитиваних радних режима повећавају потребне количине

сопственог кондензата који се убризгава у хладњацима. Треба нагласити да се у свим радним режимима постижу пројектни параметри прегрејане паре.

Најнеповољнији случај, са аспекта ефикасности, представља радни режим са увођењем хладног ваздуха у ВЗД млазнице где прорачунска вредност степена корисности износи 92,57 % а концентрација азотних оксида износи 188 mg/Nm³. Насупрот њему са 178 mg/Nm³ азотних оксида у гасовима рад са новим горионицима представља са еколошког аспекта оптималан радни режим али и инвестиционо најзахтевнији па оваква реконструкција није оправдана пошто се граничне вредности могу достићи једноставнијим мерама.

Може се закључити да се испитани примарни поступци огледају у снижавању температуре сагоревања и смањењу коефицијента вишка ваздуха у зони сагоревања, што се постиже, пре свега, рецикулацијом димних гасова ниске температуре у горионике или у језгро пламена али и вишестепеним довођењем ваздуха за сагоревање у ложиште.

Валидирани прорачуни су показали да је садржај азотних оксида, при постојећој организацији процеса сагоревања, на нивоу од 829 mg/Nm³. Анализа је показала да је смањење садржаја азотних оксида у функцији врсте и количине радног флуида који се доводи кроз систем ВЗД млазница. Тако при реорганизованом процесу са 10 % рецикулације, за рад са мешавином вредност садржаја азотних оксида износи 217 mg/Nm³, за загрејан ваздух 191 mg/Nm³ а за хладан ваздух 188 mg/Nm³.

Како је код постојећег парног котла већ предвиђена могућност коришћења рецикулације димних гасова, на начин да се рецикулисани димни гасови мешају са загрејаним ваздухом, оваква варијанта увођења мешавине ваздуха и гасова у горионике и ВЗД млазнице усвојена је као конструктивно најједноставнија за извођење а остварени садржај азотних оксида у продуктима сагоревања је близак прописаном и износи 217 mg/Nm³. Варирањем степена рецикулације показано је да коришћењем мешавине ваздуха и гасова кроз систем ВЗД млазница прописана гранична вредност емисије азотних оксида од 200 mg/Nm³ може се постићи при рецикулацији од 10,6 % и то без примене нових нискоемисионих горионика.

РЕФЕРЕНЦЕ

- [1] Directive 2001/80/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2001 on the limitation of emissions of certain pollutants into the air from large combustion plants
- [2] J. Makovicka, Mathematical model of pulverized coal combustion, Czech Technical University in Prague, Faculty of Nuclear Sciences and Physical Engineering, Prague, Czech Republic, 2008.
- [3] R.G. Heinsohn, R.L. Kabel, Sources and Control of Air Pollution, Prentice - Hall, New Jersey, 1999.
- [4] G. Stupar, et al., Assessing the impact of primary measures for NOx reduction on the thermal power plant steam boiler, Applied Thermal Engineering, Vol. 78, p. 397-409, 2015, IF(2014)=2.624, ISSN 1359-4311, DOI: 10.1016/j.applthermaleng. 2014.12.074
- [5] G. Stupar, et al., Predicting effects of air staging application on existing coal-fired power steam boiler, Applied Thermal Engineering, Vol. 149, p. 665-677, 2019, IF(2018)=4.026, ISSN 1359-4311 DOI: 10.1016/j.applthermaleng. 2018.12.070, 2019.
- [6] Lj. Brkić et al., Termički proračun parnih kotlova, Mašinski fakultet, Beograd, 2010.
- [7] ЈП „СРБИЈАГАС” НОВИ САД, Извештај о саставу гаса на ППС Батајница за период од 01.12. до 14.12.2018.
- [8] ЗБИРКА УПУТСТАВА ЗА РУКОВАЊЕ КОТЛОВСКИМ ПОСТРОЈЕЊЕМ „Панонске ТЕ-ТО” ДОО Нови Сад, ТЕ-ТО НОВИ САД, Нови Сад, 2006.