

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Енергетика и процесна техника

Предмет: Пренос топлоте и масе

Број индекса: 132/2016

Немања П. Тизманов

Смањење емисије азотних оксида у продуктима сагоревања на котловима ТЕ Костолац

Завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Проф. др Небојша Лукић - ментор

2. _____

3. _____

Датум
одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог завршног рада потребно је представити методе смањења емисије NO_x у термоелектранама и предложити најбоља решења за случај термоелектране Костолац Б.

Препоручена литература:

[1] Mitsubishi hitachi power systems еуропа и Феромонт инжењеринг д.о.о: Пројекат Костолац Б2 De NO_x

[2] Гулич, М., Бркић, Љ., Живановић, Т., Стојаковић, М: Анализа постројења за припрему угљеног праха и ложишта парног котла ТЕ Дрмно

[3] Живановић, Т., Туцаковић, Д., Бркић, Љ., Ступар, Г: Студија адаптације парног котла блока 1 у ТЕ Костолац Б

Крагујевац,

Ментор:

Др Небојша Лукић, редовни професор

РЕЗИМЕ

Имајући у виду све већи степен загађености животне средине, као и то да су постројења за производњу електричне енергије помоћу угља једни од највећих загађивача, у енергетском сектору Републике Србије улажу се све већи напори за смањење емисије штетних гасова насталих сагоревањем угља у котловима термоелектрана. У Термоелектрани "Костолац- Б", сагласно законским регулативама Републике Србије и Европске уније, поред тога што је изграђено постројење за одсумпоравање димних гасова, уводе се и мере за редукцију садржаја азотних оксида у продуктима сагоревања.

У раду су приказана пројектна решења система сагоревања са ниским садржајем азотних оксида (NO_x) на оба блока ове термоелектране.

Кључне речи : животна средина, електрична енергија, угаљ, азотни оксиди, сагоревање

ABSTRACT

Considering the increasing level of environmental pollution, as well as the fact that coal-fired power plants are one of the largest pollutants, an increasing effort is being made in the energy sector of the Republic of Serbia to reduce the emissions of coal-fired combustion in boilers of thermal power plants. In accordance with the regulations of the Republic of Serbia and the European Union, in addition to the construction of a flue gas desulphurisation plant, the Kostolac-B Thermal Power Plant also measures to reduce the content of nitrogen oxides in combustion products.

The paper presents the design solutions of a low nitrogen oxide (NO_x) combustion system on both units of this thermal power plant.

Садржај

Садржај	2
У В О Д	3
1. МЕРЕ ЗА РЕДУКЦИЈУ (смањење) ЕМИСИЈЕ АЗОТНИХ ОКСИДА (NO _x)	4
1.1 ПРИМАРНЕ МЕРЕ ЗА РЕДУКЦИЈУ АЗОТНИХ ОКСИДА	5
1.2 СЕКУНДАРНА КАТАЛИТИЧКА РЕДУКЦИЈА	7
1.3. СЕКУНДАРНА НЕКАТАЛИТИЧКА РЕДУКЦИЈА.	8
2. МЕРЕ ЗА СМАЊЕЊЕ ОКСИДА АЗОТА НА БЛОКУ 1	8
2.1 МЛАЗНИ ГОРИОНИЦИ ЗА УГЉЕНИ ПРАХ	10
2.2 КАНАЛИ ЗА СЕКУНДАРНИ ВАЗДУХ	12
2.3 СИСТЕМ ОФА 1 - КАНАЛИ ЗАГРЕЈАНОГ ВАЗДУХА ЗА ДОГОРЕВАЊЕ	13
2.4 СИСТЕМ ОФА 2 - КАНАЛИ ЗАГРЕЈАНОГ ВАЗДУХА ЗА ДОГОРЕВАЊЕ	14
4. МЕРЕ ЗА РЕДУКЦИЈУ АЗОТНИХ ОКСИДА НА БЛОКУ 2	17
4.1 ПРИМАРНЕ МЕРЕ	18
4.1.1 СИСТЕМ МЛЕВЕЊА	18
4.1.2 СИСТЕМ САГОРЕВАЊА	19
4.1.2.1 ЛИГНИТНИ ГОРИОНИЦИ	19
4.1.2.2 КАНАЛИ АЕРОСМЕШЕ	22
4.1.2.3. КАНАЛИ ЗА ПРИМАРНИ ВАЗДУХ	23
4.1.2.4. КАНАЛИ ЗА СЕКУНДАРНИ ВАЗДУХ	24
4.1.2.5. СИСТЕМ ДОВОЂЕЊА ВАЗДУХА ИЗНАД ВАТРЕ (ОФА)	25
4.2. СЕКУНДАРНЕ МЕРЕ	27
4.2.1. НАЧИН ПРИМЕНЕ СЕЛЕКТИВНЕ НЕКАТАЛИТИЧКЕ МЕТОДЕ	27
4.2.2. СИСТЕМ СКАДИШТЕЊА АМОНИЈАЧНЕ ВОДЕ	29
4.2.3. СИСТЕМ ПУМПАЊА РЕАГЕНСА (АМОНИЈАЧНЕ ВОДЕ)	30
4.2.4. СИСТЕМ КОНТРОЛЕ И ПРАЂЕЊА	30
4.2.4.1. ОПЕРАТИВНА МЕРЕЊА ЕМИСИЈЕ O ₂ , СО И NO _x	31
4.2.4.2. СИСТЕМ МЕРЕЊА ТЕМПЕРАТУРЕ ДИМНИХ ГАСОВА	31
4.3 ТЕХНИЧКИ ОПИС РЕКОНСТРУИСАНОГ ЛОЖНОГ УРЕЂАЈА	32
СА ПРИМЕЊЕНИМ КОМБИНОВАНИМ МЕРАМА	32
4.3.1 УТИЦАЈ РЕКОНСТРУИСАНОГ ЛОЖНОГ УРЕЂАЈА НА РАД КОТЛА	36
4.4. ГАРАНТОВАНИ ПАРАМЕТРИ РЕКОНСТРУИСАНОГ КОТЛА	37
4.4.1. ГРАНИЧНИ УСЛОВИ	38
5. ЗАКЉУЧАК	40
6. ЛИТЕРАТУРА	42

У В О Д

У процесима сагоревања фосилних горива настаје седам различитих оксида азота, али само два, NO и NO_2 се сматрају значајним са аспекта загађења ваздуха и они се разматрају као NO_x . Концентрације NO у продуктима сагоревања су у границама од 100 до 1.000 mg/m^3 . Из процеса сагоревања емитује се релативно мала количина NO_2 , најчешће 5-10%, осим у случају процеса сагоревања у дизел моторима. Концентрације NO_2 у продуктима сагоревања су у границама од 10 до 100 mg/m^3 . Азот субоксид (N_2O) који, такође, настаје у неким процесима сагоревања има потпуно различито дејство на животну средину. Овај оксид азота се потпуно одвојено разматра од других оксида азота јер доприноси ефекту стаклене баште. При сагоревању угља у спрашеном стању, концентрације N_2O су мање од 10 ppm, тако да се овај оксид азота посебно не разматра. У Републици Србији, велики извори загађења животне средине су термоелектране које се налазе у Колубарском и Костолачком басену лигнита. Из термоелектрана ЕПС-а емитују се велике количине азотних оксида. Према подацима за 2008. годину, емисија азотних оксида је износила 58 000 тона. Имајући у виду приближавање Републике Србије Европској Унији, и обавезу Србије да своје законе прилагоди европским, у ЈП ЕПС се последњих година интензивно ради на спровођењу мера за контролу и смањење емисије штетних материја које настају радом њених постројења.

Тема овог рада су мере које се преузимају ради смањења емисије оксида азота (NO_x) у Термоелектрани Костолац Б.

Термоелектрана "Костолац Б" (или ТЕКО Б) ради у оквиру привредног друштва "Термоелектране и копови Костолац д.о.о." које је део Јавног предузеће "Електропривреда Србије". Термоелектране Костолац су друге по величини термоелектране у Србији. Састоје се од четири блока, укупно инсталисане снаге 1000MW (ТЕКО-А+ТЕКО-В). Као гориво користе лигнит из оближњих Костолачких површинских копова.

ТЕКО Б располаже са два блока укупне снаге 700MW ($2 \times 350\text{MW}$). Због неопходности заштите животне средине и због обавеза које проистичу из нужности примене националне и међународне регулативе у области заштите животне средине (Закон о

заштити животне средине Републике Србије – сл. гласник бр.135/04, Национални програм заштите животне средине и Директива Европске уније бр.2001/80/ЕС), у Термоелектрани се улажу велики напори у изградњи нових и реконструкцији постојећих делова постројења, како би се применило што више мера за смањење емисије штетних материја у продуктима сагоревања угља.

1 МЕРЕ ЗА РЕДУКЦИЈУ (смањење) ЕМИСИЈЕ АЗОТНИХ ОКСИДА (NO_x)

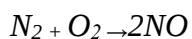
Азотни оксиди NO_x су опасни загађивачи, зато што иритирају респираторни тракт човека и претходе стварању фото-оксиданата, укључујући озон и киселог депозита . У садашње време УС ЕПА (US Environmental Protection Agency) планира да уведе строжије стандарде за озон, што неминовно укључује строжију контролу емисије (Табела 1).

NO_x из стационарних и мобилних извора, укључујући термоелектране.

супстанца	гранична вредност емисије (mg/Nm ³)
SO ₂	400*
NO _x	200
суспендоване честице – RM	50
CO	250

Табела 1. Граничне вредности емисија

Угаљ и нафта садрже органски азот у њиховој молекулској структури. Када сагоре, ова горива производе такозвани NO_x из горива. Поред тога сва фосилна горива производе термички NO_x. Он је резултат комбинације атмосферског азота и кисеоника, под условима високих температура пламена при сагоревању фосилног горива:



Ова повратна реакција укључује међурадикале, као што су атомски кисеоник и азот,

као и органске радикале, који се формирају на високим температурама. Како се продукти сагоревања хладе, формирани NO престаје да се распада на N_2 и O_2 , што би се дешавало да се термодинамичка равнотежа успостави на температурама гаса у димњаку. Како димни гасови пролазе димњак део NO оксидише у NO_2 и друге азотне оксиде.

Угаљ и тешко уље стварају и NO_x из горива и термички NO_x , док природни гас производи само термички NO_x . Угаљ и уље стварају приближно једнаке износе термичког и NO_x из горива. Димни гасови неконтролисаног сагоревања угља и уља садрже хиљаде делова NO_x по милионитом запреминском делу, док димни гасови природног гаса садрже половину тог износа.

Пошто органски азот не може бити уклоњен пре сагоревања горива, контрола NO_x емисије може бити остварена једино током и после сагоревања.

Мере које предузимамо ради редукције оксида азота (NO_x) можемо поделити на:

- ПРИМАРНЕ МЕРЕ,
- СЕКУНДАРНЕ КАТАЛИТИЧКЕ МЕРЕ,
- СЕКУНДАРНЕ НЕКАТАЛИТИЧКЕ МЕРЕ.

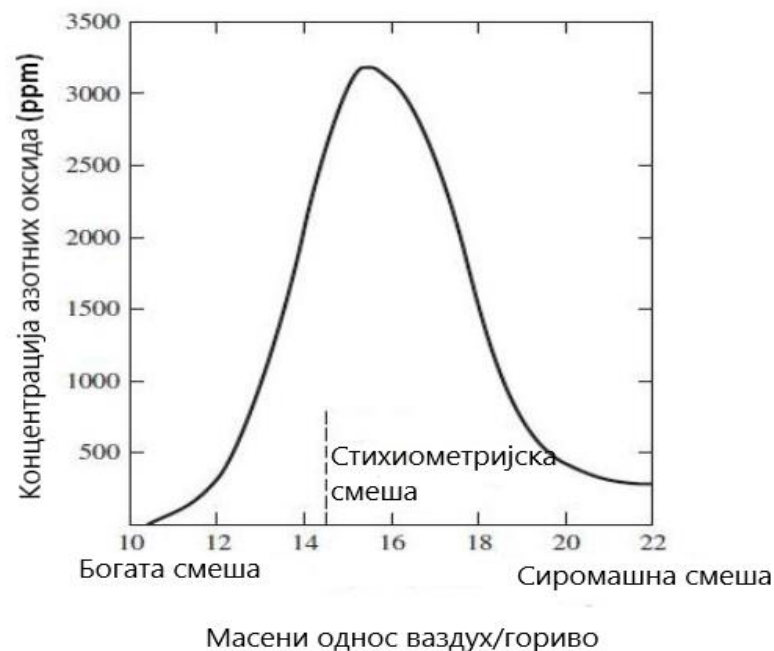
1.1 ПРИМАРНЕ МЕРЕ ЗА РЕДУКЦИЈУ АЗОТНИХ ОКСИДА

Примарним мерама делује се на сам процес сагоревања. Имајући у виду начине формирања азотних оксида, могу се дефинисати следећи захтеви за системе сагоревања са ниском емисијом NO_x :

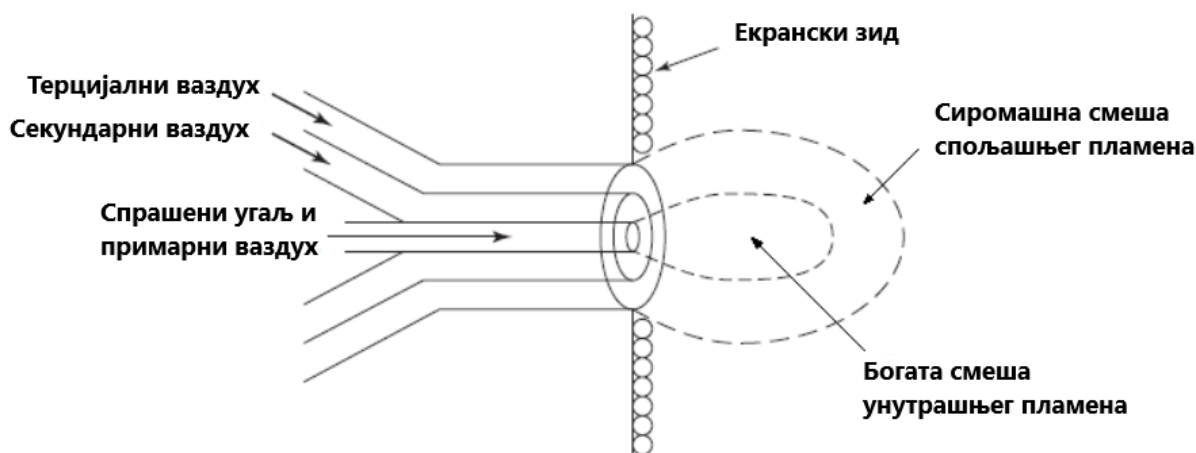
- Главно сагоревање уситњеног и осушеног лигнита мора бити изведено у под-стехиометричкој атмосфери. У зони главног сагоревања у и изнад појаса горионика, изводи се пиролиза (претварање делимичног сагоревања угљеника ради формирања угљендиоксида) горива под условима изостанка азот оксида.
- Највише температуре са доводом кисеоника ($\lambda > 1$) морају се смањити добром мешавином гасова сагоревања.

Међутим, формирањем NO_x у зони главног сагоревања је неизбежно. У случају редукције амбијенталне атмосфере, смањује се формирање азот оксида, пошто убачени угљеник скупља кисеоник из азот оксида, тако да се формирају N_2 и CO . Последишно, потребно је дуго време боравка гасова сагоревања под под-стоихиометричким условима, како би било могуће да се NO смањи колико год је могуће. До овде је само део контролисаног топлог ваздуха доведен до коморе за сагоревање. Како би се постигло високо сагоревање горива, ваздух који се доводи из зоне примарног сагоревања (ОФА) на два нивоа се убризгава у котао у високом степену како би се осигурала добра пенетрација те побољшала смеша димних гасова. Нивои ОФА морају бити уређени на што је могуће вишем нивоу како би се обезбедило довољно време за пиролизу горива и смањење NO_x како је објашњено у претходном тексту.

Након додавања првог дела ОФА потребно је измерити друго важно време боравка: Потребно време за претварање CO у CO_2 . Убризгавање овог ОФА мења атмосферу тако да се постигну приближно стехиометрички услови. Други ниво ОФА коначно обезбеђује готово потпуну конверзацију из CO у CO_2 . Температура мора бити на довољно високом нивоу како би могло да дође до реакције (Слика 1).



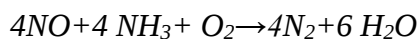
Слика 1. Зависност концентрација NO_x у пламену и односа коришћене масе ваздуха по килограму горива



Слика 2. Шематски приказ горионика ниске емисије NOx

1.2 СЕКУНДАРНА КАТАЛИТИЧКА РЕДУКЦИЈА.

У процесу селективне каталитичке редукције (SCR) било амонијак (NH_3), било уреа ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$) се убризгава у каталитички реактор, кроз који се пропушта димни гас. Пратећа хемијска реакција, када се убризгава амонијак је:

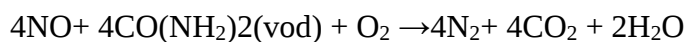


На овај начин NO се уклања амонијаком, који реагује са NO и O_2 и формира елементарни молекулски азот. Катализатор у мешавини је титанијум и ванадијум оксид распршен у структури попут саћа. SCR реактор је смештен између економајзера и загрејача ваздуха, у конструкцији котла, где је температура 300-400 °C. Ефикасност реакције је 80-90%, тако да 10-20% азотних оксида напушта постројење кроз димњак, заједно са 10-20% нереагованог амонијака. Ова појава се назива клизање амонијака. Иако је амонијак токсичан гас, с временом гас пада на земљу, а његова концентрација се не сматра штетном.

Својства катализатора се временом неутралишу, посебно ако димни гас садржи летећи пепео и сумпордиоксид, који га носе (треба имати у виду да се каталитички реактор поставља испред ЕСП и скрубера). Дакле, катализатор захтева честе замене, што представља основни оперативни трошак SCR-а. За уградњу SCR-а генерални ремонт постројења је потребан, пошто каталитички реактор мора бити уметнут између катализатора и загрејача ваздуха котловског постројења. Увећање трошкова производње електричне енергије у термоелектрани на фосилно гориво, коришћењем SCR-а је око 5-10%.

1.3 СЕКУНДАРНА НЕКАТАЛИТИЧКА РЕДУКЦИЈА.

Редукција NO може бити остварена на вишим температурама, без коришћења катализатора, селективном некаталитичком редукцијом (SNCR). У овом процесу уреа се користи уместо амонијака. Уреа се у воденом раствору убризгава у прегрејачку секцију котла, где владају температуре 900-1000 °C, што је довољно високо за скоро потпуно одвијање хемијске реакције:



Многи оператори термоелектрана преферирају ову опцију, зато што не захтева катализатор. Са друге стране, уреа је скупља од амонијака. Такође, ово решење је једноставније за уградњу у постојећу конструкцију, јер млазница урее може бити монтирана директно у цевни зид котла. Систем SNCR може бити коришћен у комбинацији са гориоником ниског NO_x. Крајња редукција NO_x је 75-90%, а увећање производне цене електричне енергије је 3-4,5%.

2 МЕРЕ ЗА СМАЊЕЊЕ ОКСИДА АЗОТА НА БЛОКУ 1

У склопу ревитализације и адаптације котла блока 1 2014. године урађена је и реконструкција система за сагоревање ради редукције NO_x.

За поменути адаптацију парног котла и припадајуће опреме ради подизања његове снаге као и увођење модернизованог система сагоревања (примарних мера), за редукцију концентрације азотних оксида, дефинисане су најосновније карактеристике

гарантног и угљева који ће се користити у наредном периоду рада електране и приказане у табели 1.

Нови гарантни угаљ, доње топлотне моћи од 7800 kJ/kg, има у елементарној анализи радног горива садржај влаге у дијапазону од 42÷45 %, минералних материја у дијапазону од 20÷26 % и азота од 0,35÷0,5 %. Вредност коефицијента мељивости, одређена по методи Хардгрове, за овај угаљ креће се од 36 до 45 а сортиман сировог угља је мањи од 60 mm. Наведене вредности коефицијента мељивости и сортимана различите су од вредности за које су изабрани предметни млинови и утичу, поред осталог, на смањење њиховог капацитета млевења.

Карактеристике угљева који ће се користити у наредном периоду у електрани

Назив	Ознака	Јединица мере	Доња топлотна моћ угља (H _d) [kJ/kg]		
			7800	8373	6489
1	2	3	4	5	6
Горња топлотна моћ	H _g	kJ/kg	8909	9990	8060
Садржај минералних материја	A ^r	%	20-26	18,41	25,02
Садржај влаге	W ^r	%	42-45	43,37	44,10
Садржај кисеоника и азота	O ^r +N ^r	%	10,92	9,96	8,50
Максимални садржај азота	N ^r	%	0,35- 0,50	0,35-0,50	-
Садржај сагорљивог сумпора	S ^r _g	%	0,52	0,56	0,70
Садржај укупног сумпора	S ^r _u	%	1,10	1,10	1,17
Садржај волатила у радној маси	V ^r	%	21,56	22,60	19,84
Садржај сагорљивих материја	G ^r	%	-	-	-
Садржај фиксног угљеника	C _{fix}	%	15,60	15,62	11,04
Коефицијент мељивости	k _H	-	36-45		
Тешко мељиви ксилит	kS _{tm}	%	≤ 20		
Сортиман радног угља	S _{ru}	mm	≤ 60		
Садржај водоника	H ^r	%	2,08	-	-
Насипна густина	γ _n	kg/m ³	750-830		

Табела 2. Карактеристике Костолачког лигнита

Изабрано Сиенс-ово решење је, поред уградње нових млазних горионика за угљени прах захтевало и реконструкцију канала за аеросмешу, канала за загрејан

секундарни ваздух као и уградњу млазница и канала за загрејан ваздух за догоревање несагорелог угља и гасова (системи ОФА 1 и ОФА 2).

Примарним мерама за редукцију азотних оксида, загрејан ваздух се прерасподељује по висини ложишта, на секундарни - који се доводи у млазне горионике за угљени прах, на први део ваздуха за догоревање (ОФА 1) - који се доводи у млазнице постављене у ложишту у области озраченог прегрејача паре и на други део ваздуха за догоревање (ОФА 2) - који се доводи у млазнице постављене на крају ложишта, непосредно испод полуозраченог (излазног) прегрејача свеже паре.

У области млазних горионика сагоревање угљеног праха се обавља у подстехиометријским условима при коефицијенту вишка ваздуха који треба, према Сиенс-овој понуди, да износи 0,95 од теоријски потребне количине ваздуха за сагоревање. Преостали загрејани ваздух се доводи у оквиру система ОФА 1 и ОФА 2 тако да коефицијент вишка ваздуха на крају ложишта износи 1,15 што је знатно мања вредност у односу на вредност овог коефицијента за нереконструисани парни котло, која је износила 1,22.

Иначе, након довођења загрејаног ваздуха за догоревање несагорелог горива и гасова системом ОФА 1, коефицијент вишка ваздуха на том месту у ложишту износи 1,05 а на крају ложишта, након довођења преосталог загрејаног ваздуха за догоревање системом ОФА 2, коефицијент вишка ваздуха износи поменутих 1,15.

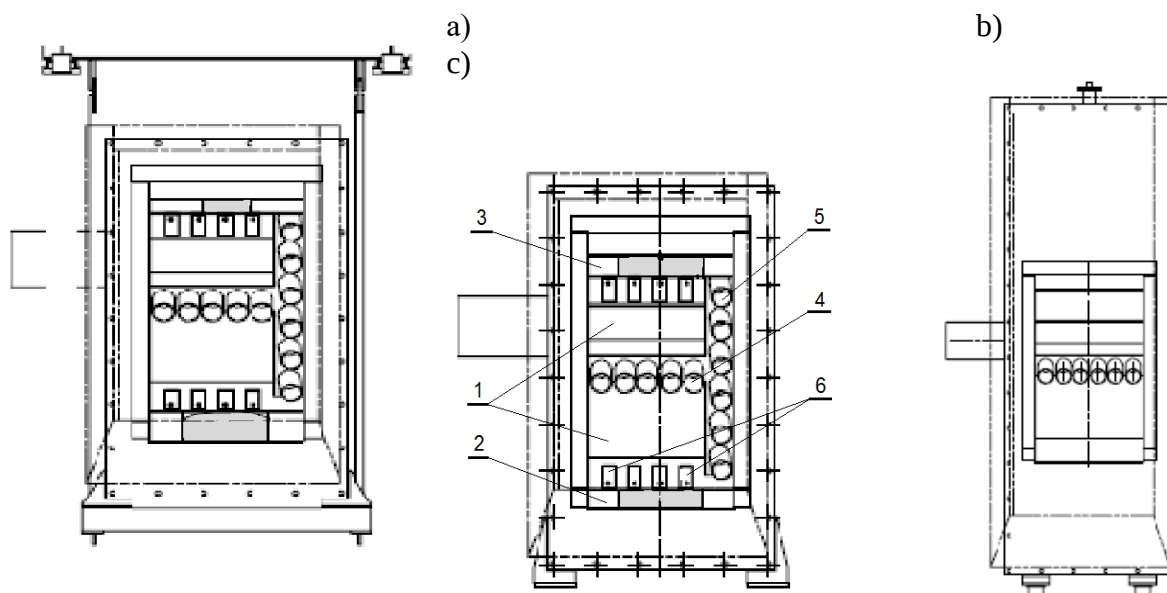
2.1 МЛАЗНИ ГОРИОНИЦИ ЗА УГЉЕНИ ПРАХ

Ложиште парног котла је снабдевано са осам млазних горионика, по два на сваком ложишном зиду. Горионици су по висини ложишта постављени следећим редоследом: доњи главни горионик на коти +17,8 m, горњи главни горионик (на коти +22,07 m и горионик за отпарке на коти +27,2 m. Нагнути су под углом од 15° према решетки за догоревање и ложишном левку и постављени у тангенцијални распоред. Сваки горионик је својим нагнутим каналом аеросмеше повезан са главним вертикалним каналом у коме су постављена два раздвајача аеросмеше. Сам изглед поменутих горионика приказан је на сл. 3.

Конструкције доњег и горњег главног горионика су, као и пресеци канала за аеросмешу и загрејани ваздух, сличне (сл. 3а и 3б). У главне горионике се аеросмеша доводи у два нивоа, кроз канале правоугаоног попречног пресека (1) приказане на сл. 3б. Између канала за аеросмешу, ради бољег мешања угљеног праха и загрејаног

ваздуха, доводи се језгрени ваздух кроз хоризонтално постављене млазнице кружног попречног пресека (4). Други део језгреног ваздуха доводи се кроз исте такве вертикално постављене млазнице са једне, десне стране канала за аеросмешу (5). Остала количина загрејаног, секундарног ваздуха доводи се кроз доње правоугаоне млазнице као доњи ваздух (2) и кроз горње правоугаоне млазнице као горњи ваздух (3). У доњем делу доњег и у горњем делу горњег канала за аеросмешу постављен је одређен број плочица, у виду "зуба" (6), ради бољег мешања угљеног праха и загрејаног, доњег и горњег ваздуха.

У горионик за отпарке, сл. 3ц, аеросмеша се такође доводи кроз два канала правоугаоног попречног пресека између којих се, кроз хоризонтално постављене млазнице кружног попречног пресека, доводи загрејани језгрени ваздух у циљу бољег мешања са угљеним прахом.



Слика 3. Млазни горионици за угљени прах

Код овог горионика није, као код главних горионика, предвиђено довођење доњег и горњег загрејаног ваздуха за сагоревање.

Код правоугаоних млазница за доњи (2) и горњи (3) загрејан ваздух, може се мењати попречни пресек за његово струјање променом ширине млазница (повећањем или

смањењем "сивих" правоугаоних површина на сл. 3). Тиме се могу регулисати брзине овог ваздуха у уским границама. Млазнице кружног попречног пресека за језгрени ваздух (4 и 5) су, код сва три горионика, истих димензија и износе $\varnothing 168, \times 7,1 \text{ mm}$.

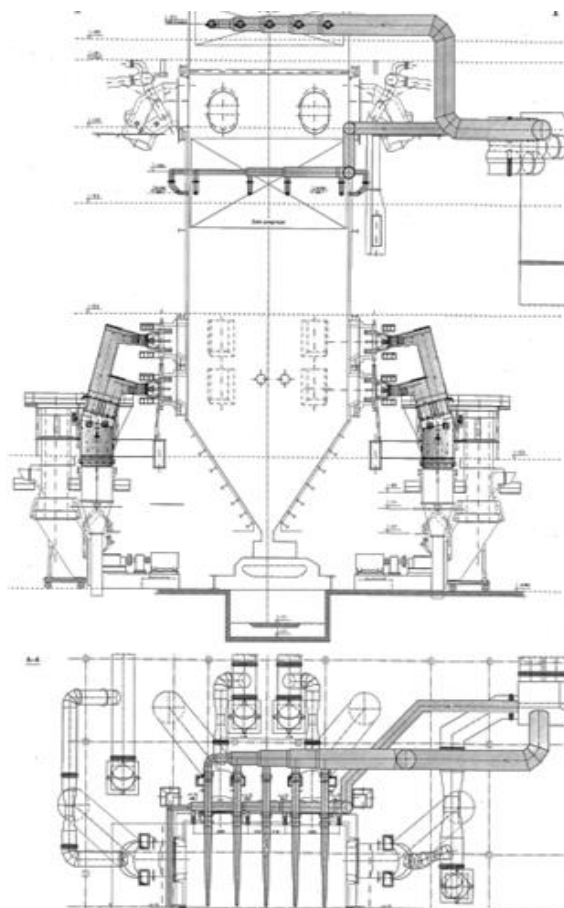
2.2 КАНАЛИ ЗА СЕКУНДАРНИ ВАЗДУХ

Приликом модернизације система сагоревања, габарити, распоред и број млазних горионика за угљени прах били су унапред дефинисани захтевом да се задржи геометрија ложишних испаривача у делу око отвора за горионике. У оквиру постојећих горионичких кавеза прилагођени су и постављени нови млазни горионици, два главна и горионик за отпарке.

Из заједничког канала за ваздух, загрејан ваздух се помоћу осам вертикалних канала, којих има исто колико и млинова, доводи као секундарни на ниво сваког од осам горионика. Из вертикалног канала се загрејани ваздух даље доводи кроз три хоризонтална канала у доњи главни горионик, кроз такође три хоризонтална канала у горњи главни горионик и кроз један хоризонтални канал у горионик за отпарке.

Доњим хоризонталним каналом, постављеним на коти +16,915 m, ваздух се уводи у правоугаоне млазнице доњег главног горионика као доњи ваздух, средњим каналом, на коти +18,165 m, у хоризонталне и вертикалне кружне млазнице као језгрени ваздух и горњим каналом, на коти +19,390 m, у правоугаоне млазнице као горњи ваздух

Исто тако, доњим хоризонталним каналом, постављеним на коти +21,275 m, ваздух се уводи у млазнице горњег главног горионика као доњи, средњим каналом, на коти +22,535 m, у кружне млазнице као језгрени и горњим каналом, на коти +23,760 m, у млазнице као горњи ваздух . Посебним хоризонталним каналом, на коти +28,030 m, загрејан ваздух се уводи у хоризонтално постављене кружне млазнице горионика за отпарке као језгрени ваздух.



Слика 4. Цртеж горионика и канала ваздуха за ОФА

2.3 СИСТЕМ ОФА 1 - КАНАЛИ ЗАГРЕЈАНОГ ВАЗДУХА ЗА ДОГОРЕВАЊЕ

Као што је раније напоменуто, системом ОФА 1 се у ложиште парног котла доводи загрејани ваздух за догоревање, путем одговарајућих млазница, у одређеној количини од теоријски потребне количине ваздуха за сагоревање. После завршеног мешања овог ваздуха са делом несагорелог горива и гасова коефицијент вишка ваздуха у ложишту износи 1,05.

Млазнице за загрејани ваздух за догоревање постављене су на сва четири ложишна зида, на коти +37,523 m, у области озраченог прегрејача свеже паре. Наиме, приликом реконструкције овог прегрејача троструки цевни панел је размакнут у његовој горњој трећини како би се по висини обезбедио простор за постављање поменутих млазница. На сваком зиду постављено је по три млазнице кружног попречног пресека, две млазнице које се налазе око осе цевног зида су исте геометрије,

пречника $\varnothing 245 \times 10 \text{ mm}$, док је трећа млазница, постављена најдаље од осе, различите геометрије у односу на прве две и већег је пречника, који износи $\varnothing 340 \times 10 \text{ mm}$.

На предњем ложишном зиду све три млазнице су постављене хоризонтално у вертикалној равни док су у хоризонталној равни постављене под различитим угловима и окренуте према левом ложишном зиду. Углови постављања износе, за најудаљенију млазницу 8° , за средњу 9° и за млазницу најближу левом зиду 20° . На задњем ложишном зиду су, такође, све три млазнице постављене хоризонтално у вертикалној равни док су у хоризонталној равни постављене под различитим угловима и окренуте према десном ложишном зиду. Углови постављања износе, као и код предњег зида, за најудаљенију млазницу 8° , за средњу 9° и за млазницу најближу десном зиду 20° . На левом бочном ложишном зиду све три млазнице су нагнуте у вертикалној равни за 5° према ложишном левку док су у хоризонталној равни постављене под различитим угловима и окренуте према задњем ложишном зиду. Углови постављања износе, за најудаљенију млазницу 10° , за средњу 12° и за млазницу најближу задњем зиду 20° . На десном бочном ложишном зиду су, такође, све три млазнице нагнуте у вертикалној равни за 5° према ложишном левку док су у хоризонталној равни постављене под различитим угловима и окренуте према предњем ложишном зиду. Углови постављања износе, као и код левог бочног ложишног зида, за најудаљенију млазницу 10° , за средњу 12° и за млазницу најближу предњем зиду 20° .

2.4 СИСТЕМ ОФА 2 - КАНАЛИ ЗАГРЕЈАНОГ ВАЗДУХА ЗА ДОГОРЕВАЊЕ

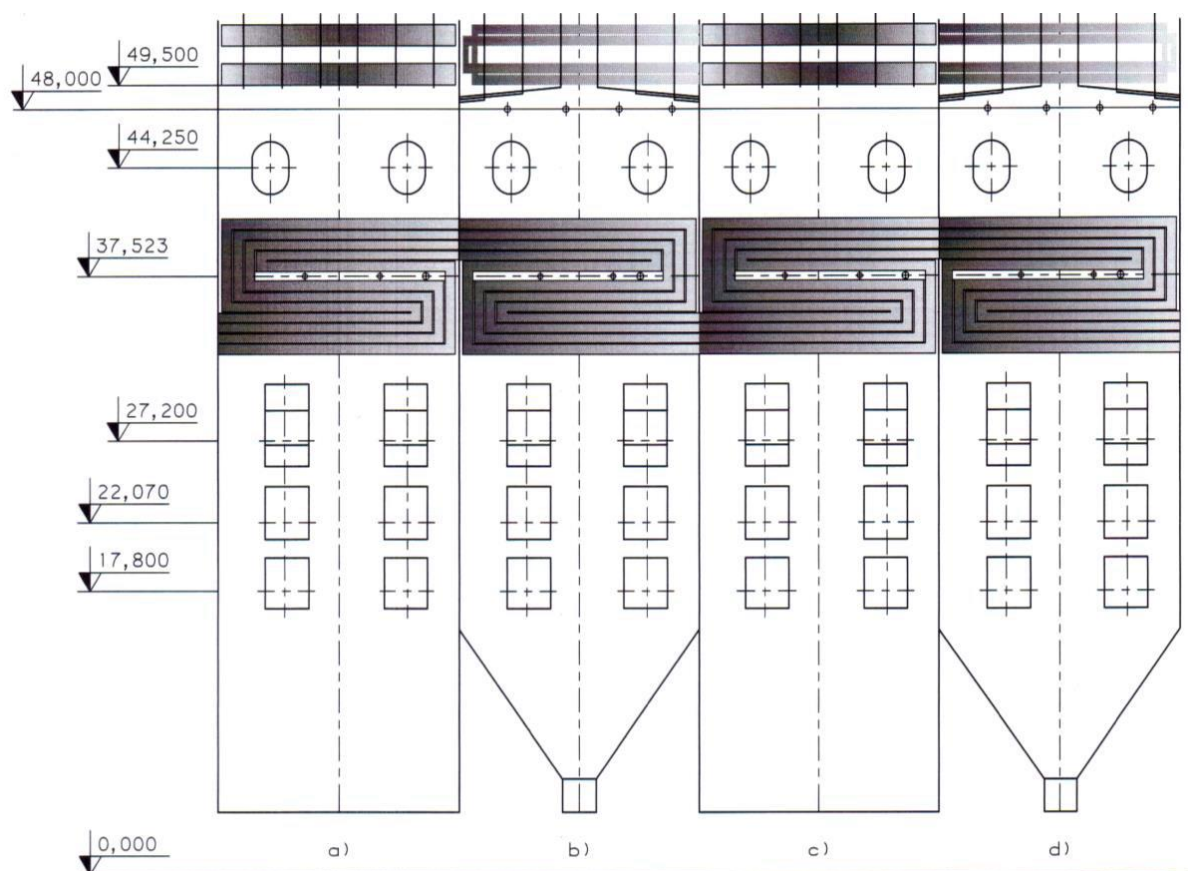
Системом ОФА 2 се у ложиште парног котла доводи преостали загрејани ваздух за догоревање несагорелог горива и гасова, путем одговарајућих млазница. Након завршеног мешања несагорелог горива и ваздуха коефицијент вишка ваздуха на крају ложишта, иза места увођења преосталог загрејаног ваздуха, износи 1,15.

Млазнице за загрејани ваздух за догоревање, у оквиру овог система, постављене су на два наспрамна ложишна зида, на коти +48,0 m, непосредно испод полуозраченог (излазног) прегрејача свеже паре, практично на излазу из ложишта. Укупно је постављено осам млазница, по четири на сваком од бочних ложишних зидова. Млазнице су кружног попречног пресека различитих пречника, $\varnothing 385 \times 10 \text{ mm}$ или $\varnothing 510 \times 10 \text{ mm}$.

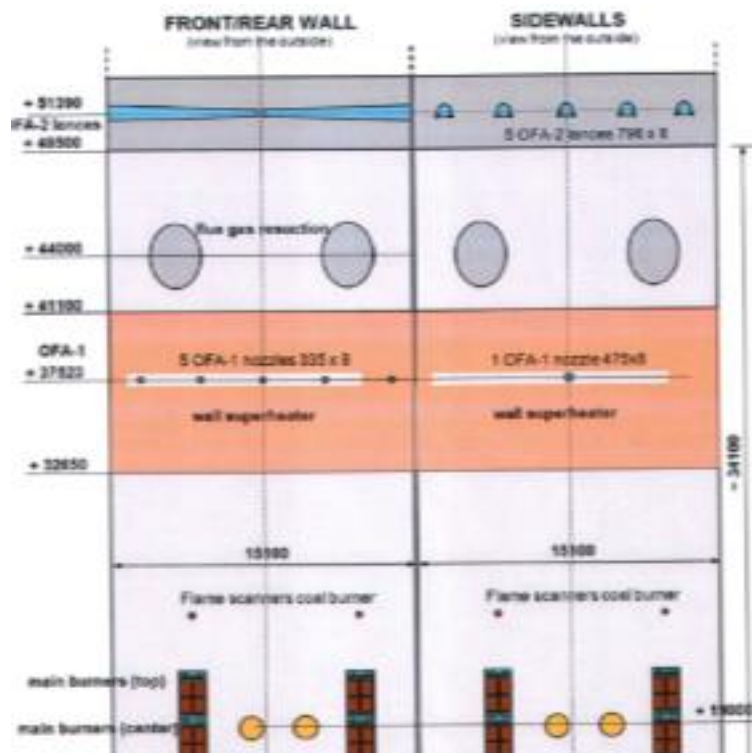
На левом бочном ложишном зиду су, на коти +48,0 m, постављене четири млазнице овог система. Почев од предњег зида ка задњем, прве две млазнице, пречника $\varnothing 385 \times 10$

mm, постављене су нормално на ложишни зид док су друге две млазнице, пречника $\text{Ø}510 \times 10$ mm, нагнуте само у вертикалној равни за 10° према ложишном левку.

На десном бочном ложишном зиду су такође, на коти +48,0 m, постављене четири млазнице. Почев од предњег зида ка задњем, прве две млазнице, пречника $\text{Ø} 510 \times 10$ mm, нагнуте су само у вертикалној равни за 10° према ложишном левку док су друге две млазнице, пречника $\text{Ø} 385 \times 10$ mm, постављене нормално на ложишни зид.



Слика 5. Системи ОФА1 и ОФА2



Слика 6. Место увођења ОФА1 и ОФА2

Након извршене реконструкције ложишта на котлу Блока 1, урађени су накнадни прорачуни и и урађена додатна испитивања, на основу којих су донети следећи закључци:

1. Реконструкцијом система сагоревања, добијена је расподела угљеног праха по етажама горионика 40:40:20, расподела транспортног флуида по етажама горионика 25:25:50 и расподела ваздуха по висини ложишта, тако да у зони горионика коефицијент вишка ваздуха износи 0,96 , након довођења загрејаног ваздуха за догоревање у систем ОФА 1 износи 1,01 и након довођења загрејаног ваздуха за догоревање у систем ОФА 2 (на крају ложишта) износи 1,15.

2. Модернизацијом система сагоревања парног котла блока 1 значајно је повећана предаја количине топлоте испаривачу смешеном у ложишту. Из тог разлога је температура продуката сагоревања на крају ложишта знатно нижа од пројектне, тако да грејне површине смештене у конвективни део котла не добијају потребну количину топлоте па се врло тешко могу остварити пројектне температуре прегрејане паре.

3. Редукција азотних оксида је значајна (око 220- 250Nm³/h), али је то ипак изнад границе које су важеће према регулативама Европске Уније (<200Nm³/h).

На основу ових закључака и на основу искустава стечених у експлоатацији блока 1 након реконструкције 2014.године, донета је одлука да се на блоку 2, ове године изврши реконструкција парног котла блока 2 уградњом система за редукцију азотних оксида, где ће се први пут у нашој земљи, применити комбинација примарне и секундарне некаталитичке методе редукције NO_x.

4 МЕРЕ ЗА РЕДУКЦИЈУ АЗОТНИХ ОКСИДА НА БЛОКУ 2

На блоку 2 су, за разлику од блока 1, постављени строжији захтеви приликом одабира начина за смањивање емисије азотних оксида.

Концентрација азотних оксида (NO_x) у димном гасу котла мора да се смањи како би се испоштовали релевантни захтеви нове Директиве ЕУ 2010/75/ЕУ (Директива о индустријским емисијама (ДИЕ)). Стога, емисије NO_x биће смањене на < 170 mg/m³ (6% O₂ у димном гасу) предузимањем примарних и секундарних мера.

Примарним мерама које су описане у даљем тексту постићи ће се концентрација NO_x у димном гасу која износи 260 mg/Nm³ или мање при продукцији паре од 1050 t/h. Концентрација CO у димном гасу остаје на нивоу од ≤ 200 mg/Nm³. Селективним некаталитичким смањењем, као секундарном мером, још више ће се смањити концентрација NO_x на < 170 mg/Nm³.

Применом примарног поступка потребно је изабрати најповољнију прерасподелу загрејаног ваздуха за сагоревање, у области горионика и у зонама ваздуха за догоревање (ОФА), како би се на крају ложишта остварила вредност коефицијента вишка ваздуха мања од постојеће, од 1,15 и постигла температура продуката сагоревања на крају ложишта погодна за одржавање основних параметара рада парног котла. У том смислу, горионике, млазнице и канале за загрејани ваздух за догоревање (ОФА) је потребно поставити у ложиште котла на одговарајућа места и у најповољнији положај за постизање оптималног садржаја азотних оксида у продуктима сагоревања. Након тога, увести секундарни поступак селективне некаталитичке редукције (Selective Non-catalytic Reduction – SNCR) у циљу даљег смањења садржаја азотних оксида, до довођења његове вредности у оквире будуће законске регулативе.

4.1 ПРИМАРНЕ МЕРЕ

Модификација процеса сагоревања примарним мерама, на предметном парном котлу, захтева реконструкцију свих осам постојећих постројења за припрему угљеног праха у делу иза вентилаторског млина, тачније од млинског сепаратора до горионика и ложишта, за сагоревање пројетног угља из копа Дрмно. Нови пројектни угаљ је квалитетнији од гарантног угља, доње топлотне моћи 7326,9 kJ/kg (табела 2), за који је реконструисан парни котао 2012. године (сл. 3) али са нешто већим садржајем азота у радном угљу.

Модификација сагоревања у ложишту котла подразумева реконструкцију млазног горионика за угљени прах са припадајућим каналима аеросмеше, промену протока загрејаног ваздуха и прерасподелу загрејаног примарног и секундарног ваздуха како у горионику тако и по висини ложишта.

4.1.1 СИСТЕМ МЛЕВЕЊА

Систем млевења чине осам вентилаторских млинова типа EVT N270.45.

Сваки млин је директно повезан са гориоником. Зависно од квалитета угља, обично је у употреби пет до шест млинова за номинално оптерећење котла.

У оквиру ремонта блока 1 2012.године, млинови су модернизовани. Повећан им је капацитет и побољшана финоћа мељаве.

Техничке карактеристике делова млинова након реконструкције:

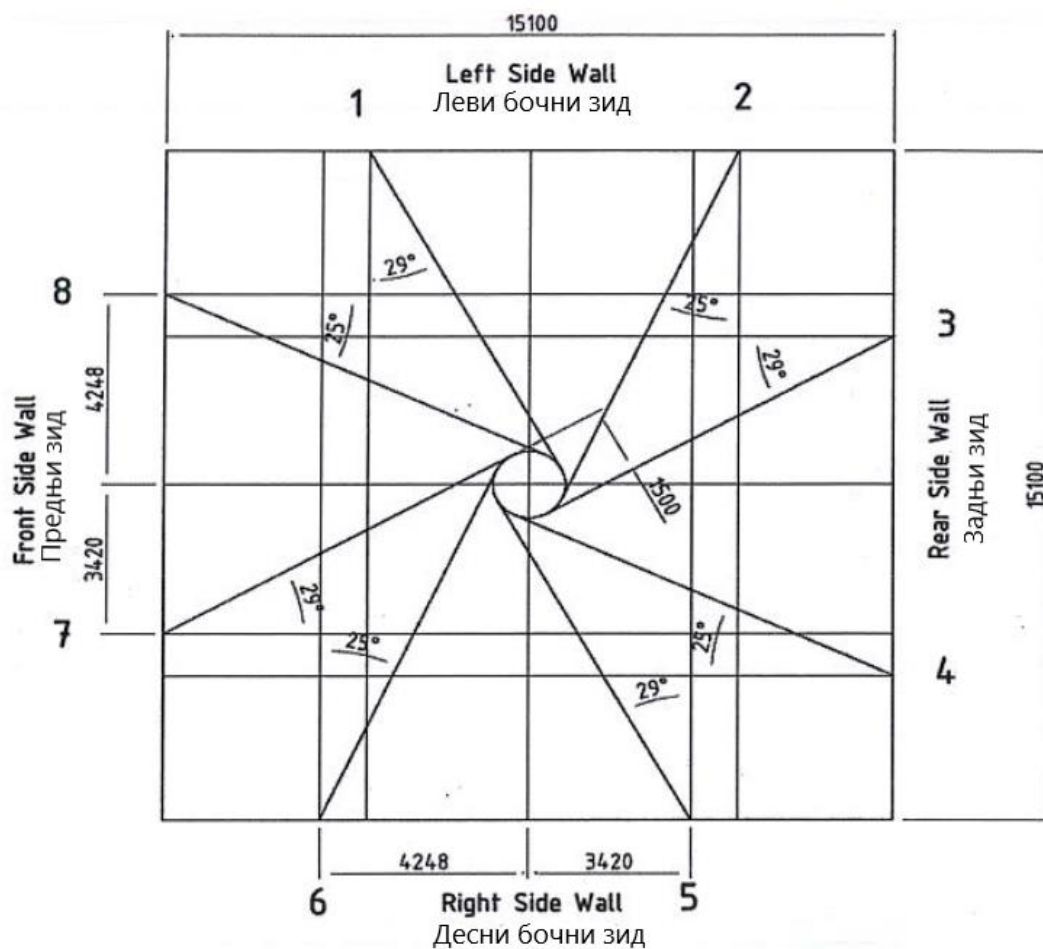
- Број млинова по блоку: 8
- Тип млина : вентилаторски млин N270.45
- спољни пречник ударног кола: 3700mm (повећање са 3600mm)
- Опсег регулације брзине радног кола : 420 – 490 o/min
- Излазна снага погона млина: 1300kW
- Макс. капацитет млина: 80t/h
- Излазна вредност протока гаса иза млина: > 270000m³/h
- Максимална излазна температура аеросмеше: 200° C
- Финоћа мељаве (остатак на сити): R1.0<7,3% ; R0.09 <56%

4.1.2 СИСТЕМ САГОРЕВАЊА

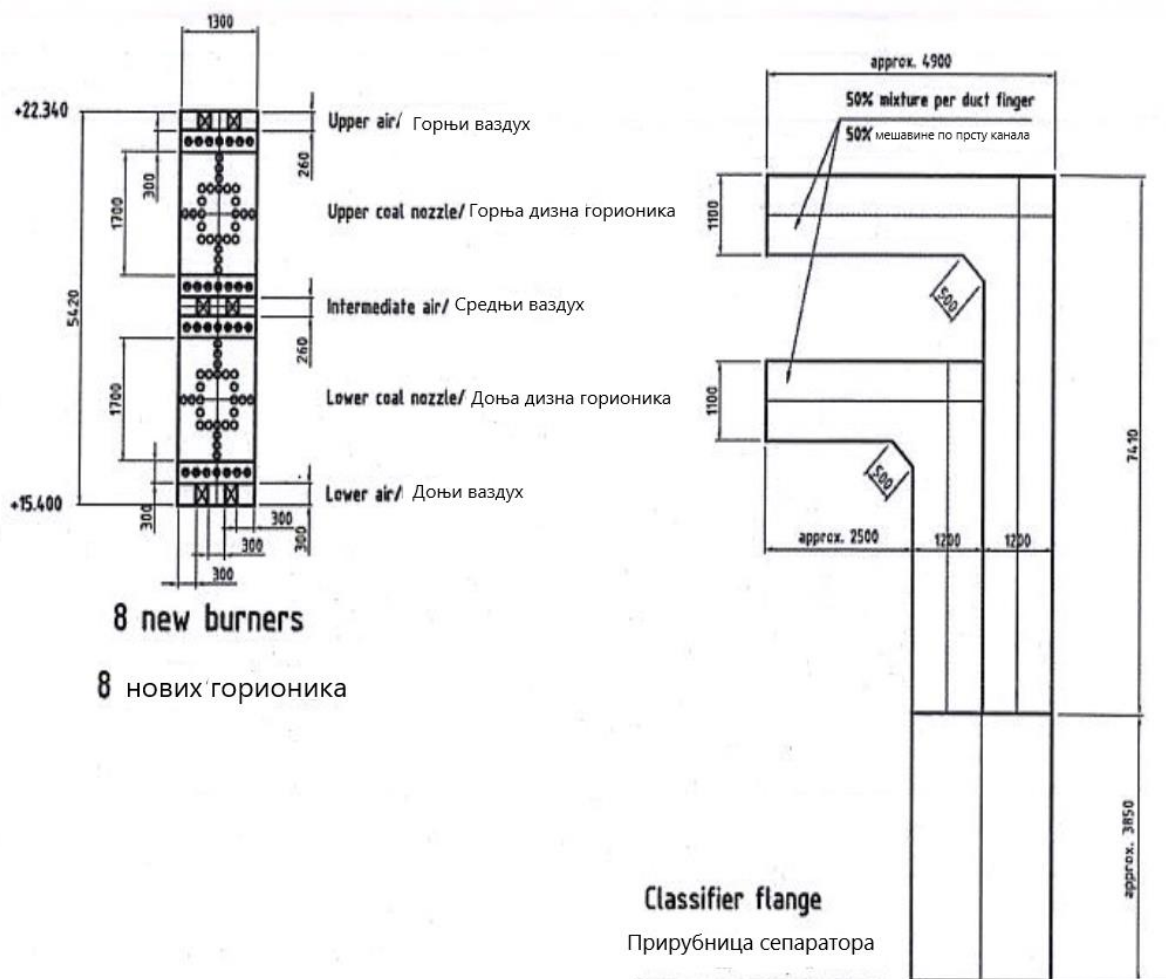
4.1.2.1 ЛИГНИТНИ ГОРИОНИЦИ

Систем са ниском емисијом NO_x сагоревања јесте систем директног сагоревања са осам нових млазних горионика са ниском емисијом NO_x (LNB) смештених у доњем делу ложишта. Два горионика на угаљ су инсталирана на сваком зиду ложишта. Сваки од горионика угља додељен је једном млину за угаљ.

Основни распоред горионика за угаљ приказан је на слици 7. Горионици су подешени тангенцијално према кругу у центру ложишта. Горионици су обликовани тако да је стехиометрија изнад појаса горионика 0.95.

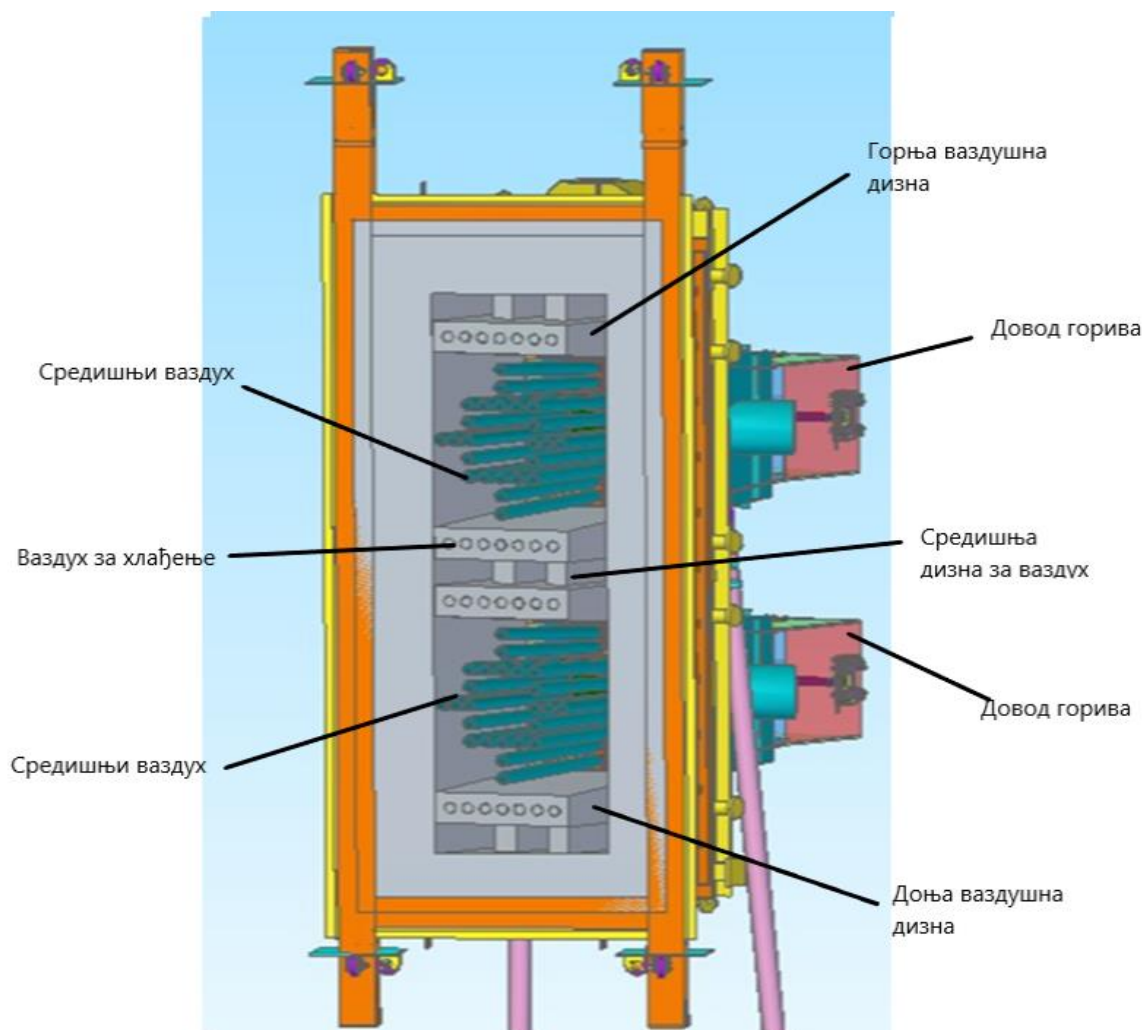


Слика 7. Основни распоред горионика за лигнит



Слика 8. Горионици и канали аеросмеше

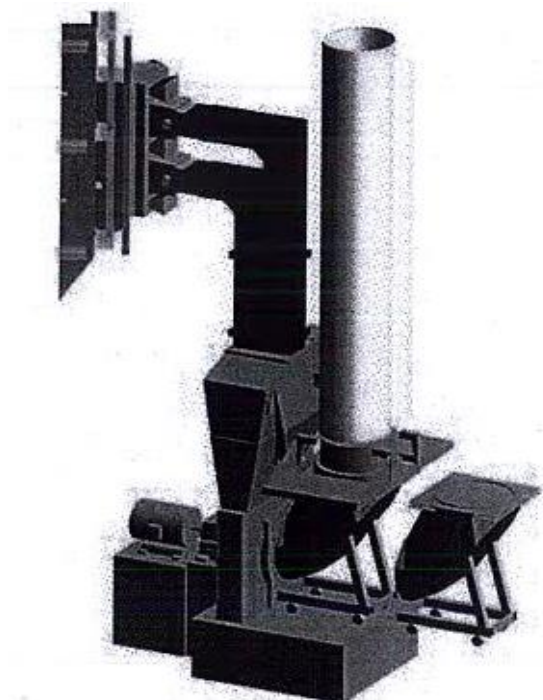
Распоред обезбеђује ниске температуре на излазу из ложишта, као и добро сагоревање честица угља, на тај начин минимизирајући количину сагоривих материја у летећем пепелу. Поред тога, време боравка димних гасова у ложишту је максимализовано, што је повољно имајући у виду примену примарних мера за смањење NO_x . Следећа слика 9. приказује 3D модел млазног горионика са ниском емисијом азот оксида.



Слика 9. Млазни горионик са ниском емисијом NOx

Горионик се састоји од две дизне за угаљ и три одељка за секундарни ваздух за сагоревање. Одељци секундарног ваздуха (доњи, средњи и горњи ваздух) подељени су у три дела. Два спољна одељка се могу отворити, односно затворити једном клапном, док засебна клапна управља другим одељком. Током нормалног рада котла, клапне се отварају, односно затварају контролним системом блока у зависности од актуелног протока ваздуха сагоревања како би се одржале велике брзине секундарног ваздуха.

Горње и доње дизне за угаљ су опремљене средишњим ваздушним цевима које штите од термичког зрачења. Средишње ваздушне цеви примају ваздух за хлађење. Дизне за угаљ опремљене су концентраторима како би се поспешило паљење и стабилност сагоревања.

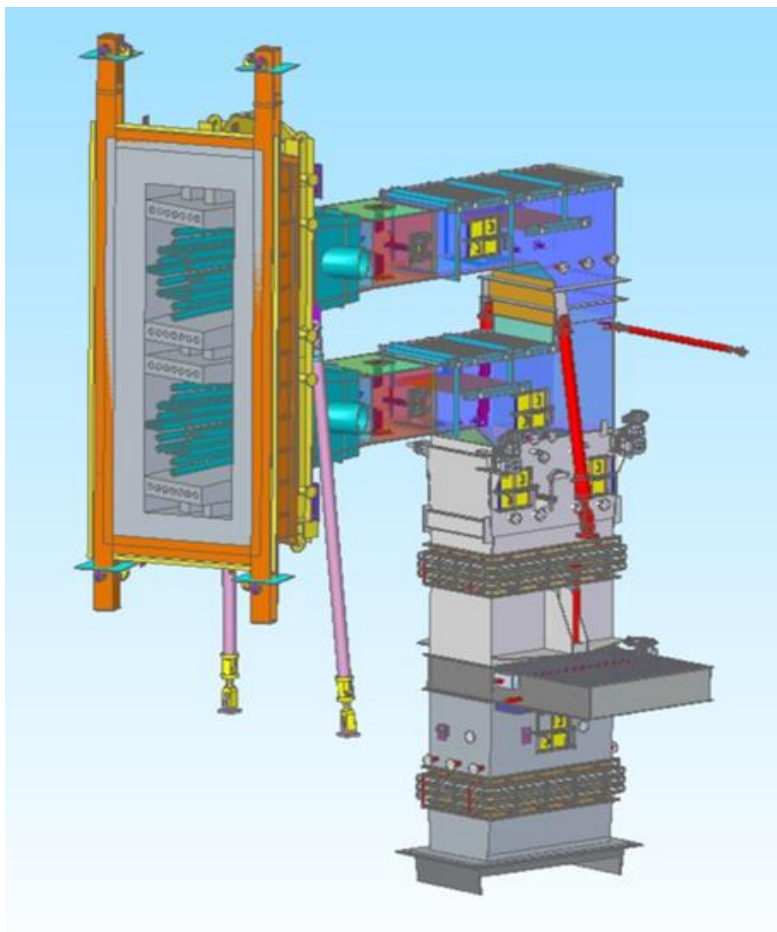


Слика 10. Горионик са ниском емисијом NOx повезан на постојећи млин

4.1.2.2 КАНАЛИ АЕРОСМЕШЕ

Канали аеросмеше од излаза и сепаратора ка улазу у горионик биће замењени новим каналима. Слика приказује типичан канал аеросмеше. Главне компоненте канала аеросмеше су:

- Ојачање хоризонталног дела канала са гредицама на горњој страни
- Електрично погоњене клапне
- Приступна врата
- Мерни елементи
- Челични компензатори
- Табласти затварач



Слика 11. Типичан канал аеросмеше

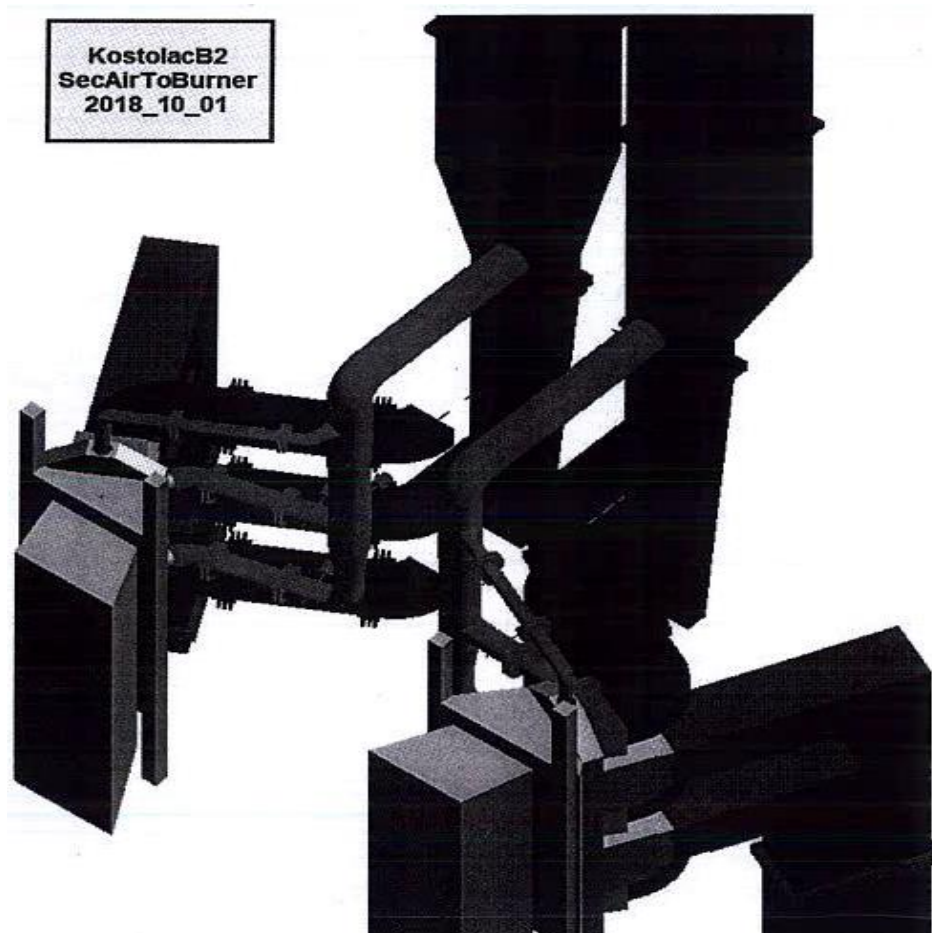
4.1.2.3 КАНАЛИ ЗА ПРИМАРНИ ВАЗДУХ

Канали за примарни ваздух нису реконструисани за потребе модификације процеса сагоревања примарним мерама. У свако од осам постројења за припрему угљеног праха доводи се одређена количина примарног ваздуха, постојећим каналима за загрејан ваздух, за потребе регулације температуре аеросмеше а у циљу сушења угљеног праха у процесу његовог млевења.

4.1.2.4 КАНАЛИ ЗА СЕКУНДАРНИ ВАЗДУХ

Канали за секундарни ваздух приказани су делимично на сл. 12. Саме трасе канала око котла и ложишта су остале непромењене али су промењени пресеци за струјање секундарног ваздуха и нивои (коте) на које се ваздух доводи.

Заједничким вертикалним каналом, којих око ложишта котла има осам колико и постројења за припрему угљеног праха, загрејани секундарни ваздух у около стехиометријској количини (0,95 до 1,05 од теоријски потребне) струји надоле и доводи се до висине новог млазног горионика, односно, до његових хоризонталних прикључака за канале за аеросмешу.

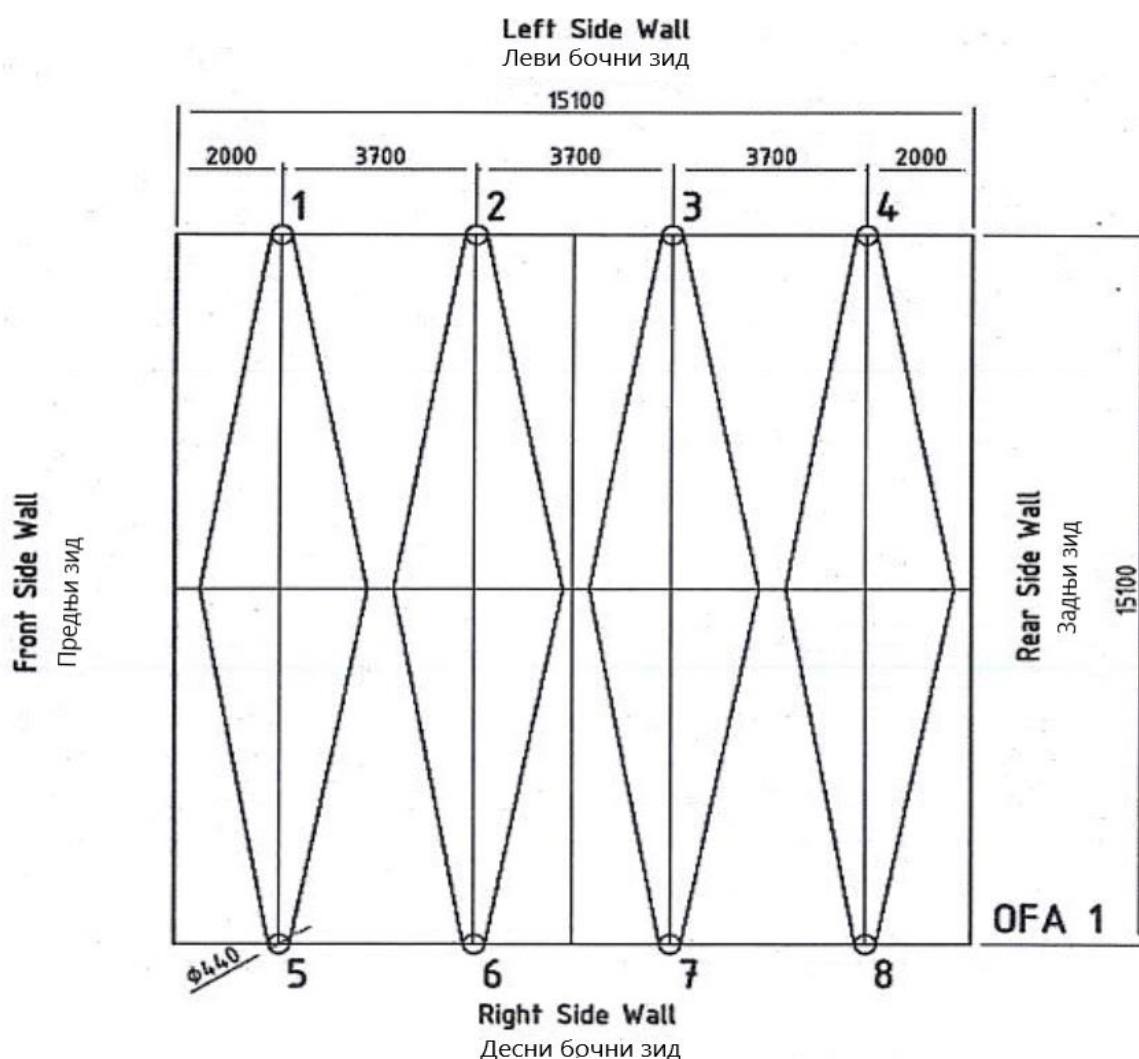


Слика 12. Канали секундарног ваздуха са два горионика

4.1.2.5 СИСТЕМ ДОВОЂЕЊА ВАЗДУХА ИЗНАД ВАТРЕ (ОФА)

Осим нових горионика на угаљ, систем са ниском емисијом NO_x састоји се од два нова нивоа ваздуха који се одводи из зоне примарног сагоревања (ОФА 1 и ОФА 2).

ОФА 1 има осам дизни. Четири дизне су инсталиране на сваком бочном зиду (леви и десни зид) одмах испод зидног прегрејача П1 на око +30.500m. Слика 13. показује основни распоред.



Слика 13. Распоред нивоа ОФА 1

Кота +30,50m – Ниво ОФА 1 дизни

- 8 отвора за ОФА 1 дизне, пречник $\text{Ø}440\text{mm}$ (4 отвора по сваком бочном зиду)

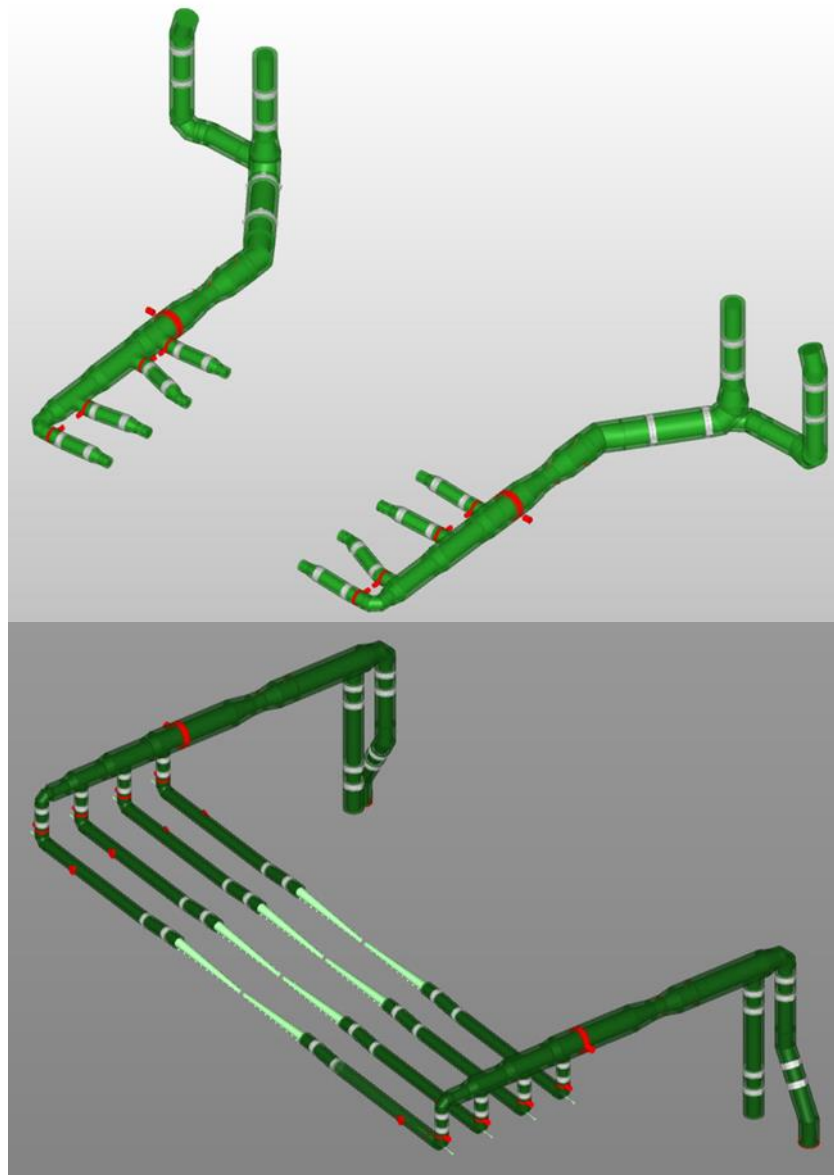
ОФА 1 је обликован тако да је стехиометрија изнад ОФА 1, 1,05.

Кота 51,150m – Ниво ОФА 2 копља унутар котла

- 8 отвора за ОФА 2 копља, пречник Ø720mm (4 отвора по сваком бочном зиду)

ОФА 2 је обликован тако да је стехиометрија изнад ОФА 2, 1,15.

ОФА 2 копља омогућавају повољну дистрибуцију ваздуха попречно преко ложишта. Од ОФА 2 се захтева да минимизује емисије CO, те да постигне повољно сагоревање честица угља. Изведба копаља спречава ерозију грејне површине. Два копља која стоје једно насупрот другог су механички повезана у центру котла. Копља су ослоњена на грејну површину.



Слика 14. Распоред нових канала ОФА 1 (са млазницама) и ОФА 2 (са копљима)

4.2 СЕКУНДАРНЕ МЕРЕ

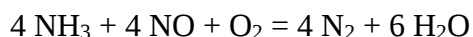
До сада у нашој земљи нигде нису примењене секундарне мере за редукцију азотних оксида, па се у Термоелектрани Костолац и Електропривреди Србије водило рачуна да се изабере најповољније, најбезбедније и најсврсоходније решење. Донета је одлука да се примени селективна некаталитичка редукција.

4.2.1 НАЧИН ПРИМЕНЕ СЕЛЕКТИВНЕ НЕКАТАЛИТИЧКЕ МЕТОДЕ

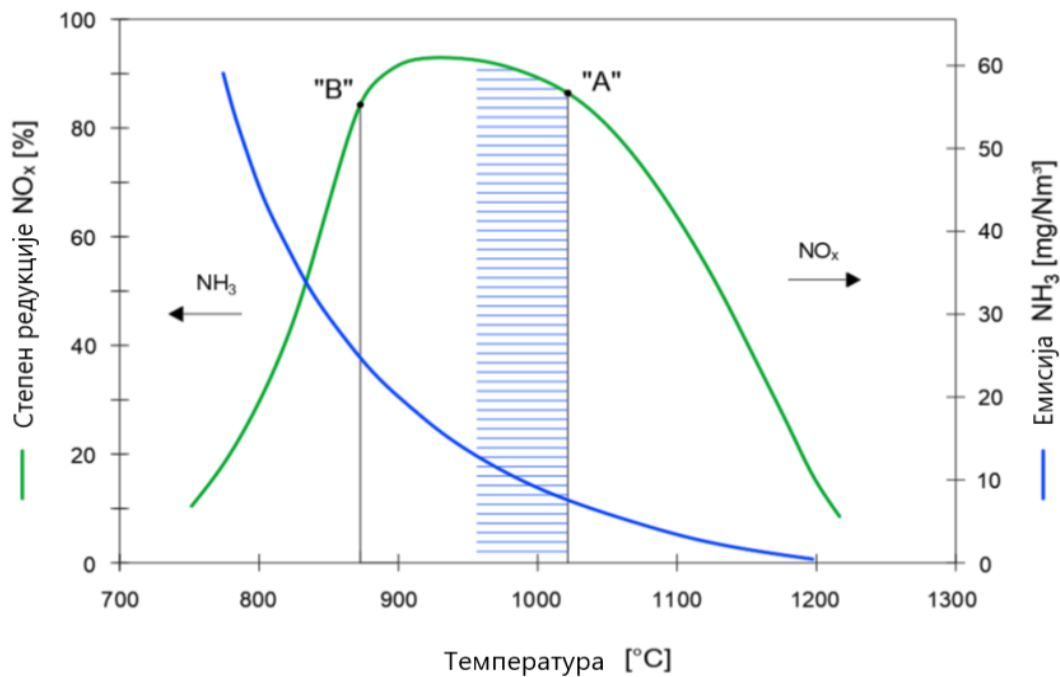
Селективна некаталитичка редукција (SNCR - Selective Non-catalytic Reduction) представља један од секундарних поступака за смањење садржаја азотних оксида у продуктима сагоревања након процеса сагоревања горива у ложишту парног котла. Овај поступак се може применити код постојећих ложишта енергетских парних котлова или приликом изградње нових. Такође се, у циљу даљег смањења садржаја азотних оксида, може комбиновати са поступком селективне каталитичке редукције или са примарним поступком.

Поступак примене SNCR заснива се на убризгавању раствора или смеше реагенса у гасни тракт котла. Најчешће коришћени реагенси, који се примењују у системима SNCR, јесу уреа (NH_2CONH_2) и амонијак (NH_3). На предметном котлу, користиће се амонијак.

Упрошћени прикази хемијских реакција током рада са овим поступком, приликом убризгавања урее или амонијака, дат је следећим изразом:

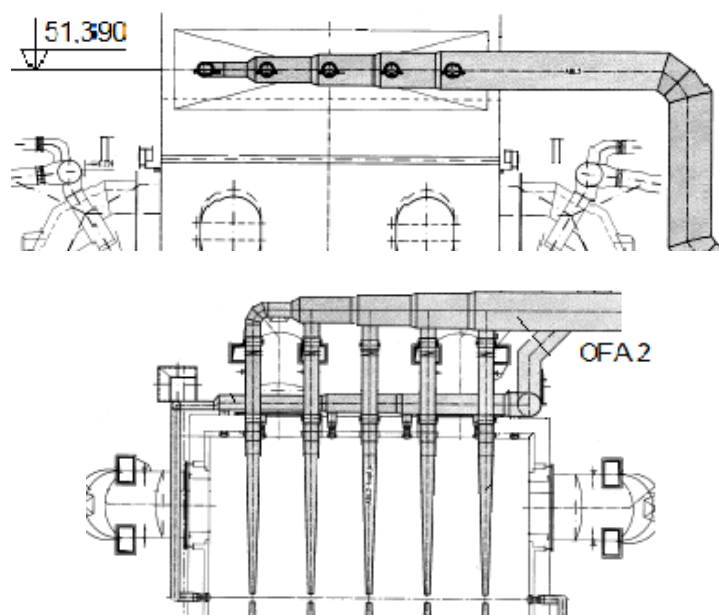


За разлику од SCR поступака, поступак SNCR се заснива на селективној редукцији азотних оксида без присуства катализатора. Услед одсуства катализатора, а у циљу постизања редукције садржаја азотних оксида према хемијским реакцијама (1) или (2) потребно је раствор или смешу реагенса убризгати у продукте сагоревања у температурском подручју 870 °C до 1020 °C, између тачака "А" и "В", слика 15.



Слика 15. Утицај температуре производа сагоревања на степен редукције азотних оксида и емисију амонијака при раду SNCR

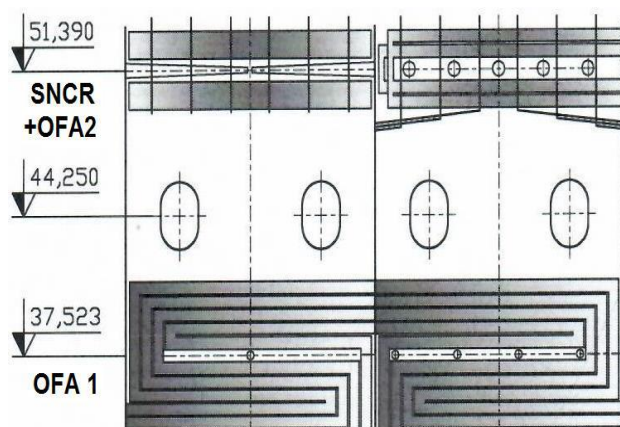
Поред тога, редукцију садржаја азотних оксида је потребно остварити уз што мању емисију амонијака у околину, дефинисану законском регулативом. У складу са тим, при раду са системима SNCR пожељно је раствор или смешу реагенса убризгавати у гасни тракт у тачно одређеној количини и у уском температурском подручју, приказаном на сл. 15 плавом шрафираном површином.



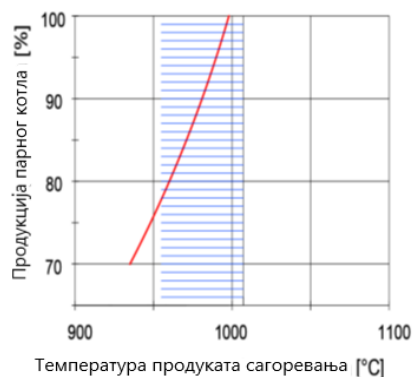
Слика 16. Систем SNCR на предметном котлу

Увођење примарних мера путем система млазница ОФА 1 и ОФА 2 (тачка 4.1.2.5), постоји могућност да се водени раствор амонијака, амонијум хидроксид, убризга у гасни тракт котла кроз копаља и млазнице за ваздух система ОФА 2, заједно са загрејаним ваздухом за догоревање (слика 17а).

а)



б)



Слика 17. Поступак SNCR комбинован са примарним поступком

Убризгавањем смеше амонијака и загрејаног ваздуха помоћу копаља постављених на коти +51,390 m, у простор између цеви полуозраченог (излазног) прегрејача свеже паре, постићи ће се, пре свега, правилна расподела реагенса у попречном пресеку гасног канала и извршиће се истовремено додатна редукција садржаја азотних оксида у продуктима сагоревања и даље догоревање несагорелог горива (несагорелих гасова и угљеника у летећем пепелу). На тај начин, остварила би се квалитетна комбинација поступка SNCR са примарним поступком. Треба такође напоменути, да се вредност температуре продукта сагоревања на месту постављања копаља (сл. 17.б), унутар полуозраченог прегрејача свеже паре, мало мења са променом продукције котла и да је она у складу са температурским током при коме је редукција садржаја NO_x најповољнија, плава шрафирана површина.

4.2.2 СИСТЕМ СКАДИШТЕЊА АМОНИЈАЧНЕ ВОДЕ

Складиштење ће се вршити у танку (резервоару) стандардне изведбе. Систем за складиштење ће бити изведен тако да се танк налази у удубљењу (танквани) које се понаша као прихватни резервоар у случају цурења из танка. Танк није под притиском (-3 до +5 mbar), из ког разлога нису потребни вентили сигурности нити испусни

вентили. Систем ће бити опремљен мерењем нивоа и крајним прекидачима за минимални и максимални ниво, што обезбеђује поуздан рад.

4.2.3 СИСТЕМ ПУМПАЊА РЕАГЕНСА (АМОНИЈАЧНЕ ВОДЕ)

За пренос редукционог реагенса из складишног танка у систем убризгавања котла, предвиђен је систем за пренос. Систем је опремљен једном пумпом. Како би се обезбедио константан притисак у систему убризгавања, биће инсталиран преливни вентил (рециркулациони вентил), који регулише притисак након инсталирања пумпе. Трансмитер притиска је предвиђен за праћење притиска после преливног вентила. Систем за пренос постављен је напољу близу складишних резервоара, а унутар складишног удубљења.

4.2.4 СИСТЕМ КОНТРОЛЕ И ПРАЋЕЊА

Контролни системи обезбеђују потпуно аутоматски, сигуран и економичан рад SNCR система у сваком редовном стању рада.

Контролни систем је имплементиран у DCS систем котла. Садржи контролне секвенце за цело SNCR постројење укључујући комуникацијски интерфејс за све делове постројења SNCR.

Сигнали из NO_x анализатора и сигнал оптерећења котла (проток димних гасова, проток паре, капацитет) се користе за одређивање потребних количина редукујућег агенса NO_x . Ове количине се подешавају на излазу регулатора NO_x .

Улазна вредност за NO_x регулатор је тренутни NO_x , коју обезбеђује мерна јединица за емисије котла. Регулатор рачуна дневне просечне вредности. Помоћу њих се дефинишу потребне количине редукујућег агенса NO_x -а, како би се испунили циљеви емисије.

Одређивање потребних количина редукујућег агенса NO_x врши се у систему контроле постројења SNCR. Основна контрола одређује количину редукујућег агенса, на основу прилагођене граничне вредности NO_x (подешена тачка) и оптерећења котла. Ова вредност се даје регулатору протока редуктора NO_x -а као референтна тачка. Измерена концентрација NO_x у целокупној количини (чисти гас) користи се за исправљање основно одређене количине редукујућег агенса.

Да би се одредила просечна NO_x вредност, користе се специјални алати (регулатори) у софтверу. Регулатор одређује референтну тачку за регулатор протока редукујућег агенса за сваку инјекциону групу.

Контролни систем такође утврђује која ће се група штапова активирати у одређено време у складу са индикацијом система за мерење температуре. Такође одређује у којим нивоима треба извршити инјекцију. Поред тога, за сваку групу одлучује се посебно да ли се инјекција извршава на 1 или 2 различита нивоа истовремено и ако је тако, коју концентрацију разблаженог редукујућег агенса треба обезбедити за сваки ниво инјекције.

Количина воде за разређивање се такође контролише. Референтна тачка за регулатор воде за разређивање зависи од количине редукујућег агенса, броја инјектора у раду температуре димних гасова у свакој одређеној зони и оптерећења котла.

Контролни систем такође садржи систем заштите којим се пружају информације за откривање узрока прве грешке, као ти комплетан низ догађаја.

4.2.4.1 ОПЕРАТИВНА МЕРЕЊА ЕМИСИЈЕ O_2 , CO И NO_x

Рад јединице са ниском емисијом NO_x захтева инсталацију нове или унапређене мерне опреме у постојеће оперативне мерне системе на путањи димног гаса. Поуздана мерења O_2 (обично са цирконијумским сондама) мора бити доступно пре позиције регенеративног загрејача ваздуха (RAPH). Мерења емисије CO и NO_x морају бити доступна за контролу и регулацију система сагоревања.

4.2.4.2 СИСТЕМ МЕРЕЊА ТЕМПЕРАТУРЕ ДИМНИХ ГАСОВА

Систем мерења температуре димних гасова поставља се у зидове котла. Осим као водећа вредност за контролу количине и нивоа убризгавања реагенса, овај мерни систем се паралелно може користити за оптимизацију сагоревања (млинови, горионици, расподела ваздуха итд.)

Систем мерења температуре и димних гасова састоји се од 10 пирометара зрачења (распон $750 - 1800^{\circ} C$) и одређује у реалном времену дистрибуцију температуре и температуре димних гасова на основу зрачења светлећег пламена.

Мерни систем се састоји од 8 пирометара смештених око пећи – 2 на сваком зиду на висини од 43m. Ови се користе за мапирање температуре (томографска карта) која указује на контуре изотерме. Још два пирометра су уграђена у други слој на висини од

46m, изнад слоја мапирања температуре, како ви се утврдило смањење температуре по висини пећи.

Пресек пећи је подељен у неколико правоугаоних зона, који се додељују групама за убризгавање. Систем мерења температуре обезбеђује просечну температуру на целој пећи и просечне температуре у свакој температурној зони. Одступање просечних температура у односу на просечну температуру целог попречног пресека се користи за одређивање група активних инјектирања и количине убризганог редукујућег агенса тако да се обезбеди реакција између NO_x и редукујућег агенса која се увек одвија у подручјима најбоље температуре.

Поред температуре димних гасова, пирометри одређују оптичку дебљину обима пламена. Пошто је оптичка дебљина повезана са емисивношћу пламена (важећа за просечне дужине таласа $0.9 \mu\text{m}$) емисивност се аутоматски разматра током мерења температуре, што резултира одређивањем коефицијента апсорпције, који описује замућеност запремине пламена и зависи од оптерећења котла, врсте горива и локалног вишка ваздуха. На тај начин се дају информације о квалитету сагоревања, који је приказан и на екрану у оквиру томографске мапе.

4.3 ТЕХНИЧКИ ОПИС РЕКОНСТРУИСАНОГ ЛОЖНОГ УРЕЂАЈА СА ПРИМЕЊЕНИМ КОМБИНОВАНИМ МЕРАМА

На сл. 18 приказана је предложена реконструкција ложног уређаја парног котла блока 2 и увођење комбинованих мера у циљу редукције емисије NO_x у продуктима сагоревања. Из ложишта парног котла (1) одузимају се врели продукти сагоревања са врха ложишта и каналом за рециркулисане гасове (2) уводе се у вентилаторски млин (3). Истовремено се у млин доводи припремљени угаљ из копа Дрмно, радни угаљ, који се у млину истовремено меље и суши. Самлевени угаљ се затим уводи у млински сепаратор (4), инерцијалног типа, у коме се недовољно самлевене честице враћају у млин на поновно млевење а припремљени угљани прах се из сепаратора уводи у канал аеросмеше (5). Аеросмеша се у заједничком вертикалном каналу дели и скреће у два хоризонтална канала, доњи и горњи, ка етажама млазног горионика за угљени прах (6). Подела аеросмеше је предвиђена у односу 50:50 али се клапном, постављеном на крају вертикалног канала, може и другачије поделити, на пример 60:40.

У млазни горионик се, поред угљеног праха, доводи и ваздух за сагоревање. Укупни загрејани ваздух за сагоревање се, после загревања у загрејачу, одводи каналима ка ложишту и дели на примарни ваздух, за потребе регулисања температуре сушећег флуида и температуре аеросмеше иза вентилаторског млина, на секундарни ваздух, који се каналима (8) доводи у етаже горионика (6) и меша са угљеним прахом за потребе његовог паљења и сагоревања и на терцијарни ваздух, који се доводи у левак ложишта, испод решетке за догоревање, у количини потребној за сагоревање несагорелих честица угља које су на њу доспеле. Мањи део загрејаног ваздуха се, по потреби, доводи за горионике за потпално и потпорно ложење (7) као и део ваздуха за хлађење котловске опреме и уређаја који су изван погона.

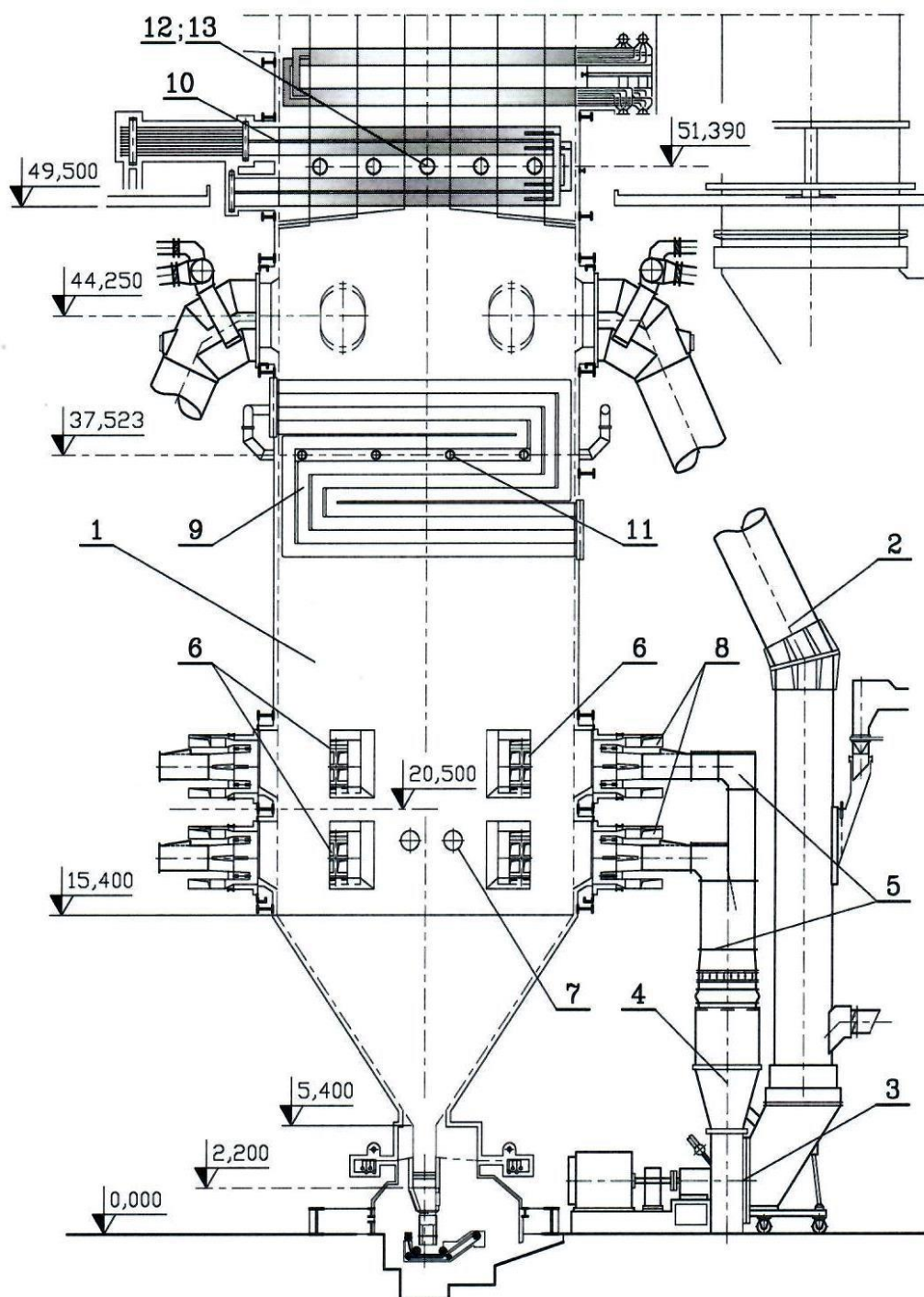
Сва три поменута загрејана ваздуха, примарни, секундарни и терцијарни, доводе се у збиру са ваздухом за потребе котловске опреме (за заптивање млина и хлађење горионика за течено гориво), хладним присисаним ваздухом у млинском постројењу и у ложишту у подстехиометријској количини, која износи 0,95 од теоријски потребне количине. На тај начин се у ложишту котла одвија процес непотпуног, подстехиометријског, сагоревања због чега се, уз мању укупно утрошену количину ваздуха, снижава максимална температура сагоревања што доприноси смањењу садржаја азотних оксида у процесу сагоревања.

Преостали загрејани ваздух се доводи у ложиште као ваздух за догоревање. За постојећа ложишта и одговарајуће прегрејаче свеже и накнадно прегрејане паре системи млазница ваздуха за догоревање, код увођења примарних мера, постављају се на различитим нивоима од нивоа постављања код новопроектованих ложишта.

Место постављања првог нивоа млазница загрејаног ваздуха за догоревање изнад пламена, систем ОФА 1 (11) код предметног ложишта је изабрано у озраченом прегрејачу свеже паре (9), на коти 37,523 m. Наиме, током реконструкције овог прегрејача свеже паре остављен је између цевних змија довољан простор за сличне намене. Место постављања другог нивоа млазница загрејаног ваздуха за догоревање, систем копаља са млазницама ОФА 2 (12), налази се непосредно изнад ложишта у полуозраченом прегрејачу свеже паре (10), на коти +51,390 m. То је једино место у конвективном гасном каналу, непосредно иза ложишта по току продуката сагоревања, где може несметано да се постави систем копаља и изврши догоревање несагорелог горива.

Код предметног ложишта парног котла блока 2 се изнад пламена, који се формира у ложишту током процеса непотпуног сагоревања, уводи један део загрејаног ваздуха за догоревање кроз систем млазница ОФА 1 у количини 0,1 од теоријски потребне (поз. 11 на сл. 18.) На тај начин се врши догоревање једног дела несагорелих гасова и честица угља у ложишту и одржава нижа температура сагоревања уз коефицијент вишка ваздуха од 1,05.

Коефицијент вишка ваздуха је у почетку сагоревања, у нивоу горионика, нешто мањи од 1,0, тачније 0,95, а после увођења дела ваздуха за догоревање кроз систем млазница ОФА 1, нешто је већи од 1,0, тачније 1,05. То обезбеђује да се, код постојећих енергетских ложишта, процес сагоревања одвија у подстехиометријској и околу стехиометријској области сагоревања. Тиме се снижава максимална температура сагоревања и постиже одговарајућа редукција емисије NO_x (тачка 3.1.2). Температура продуката сагоревања на крају ложишта је, уз смањен коефицијент вишка ваздуха са пројектних 1,22 на 1,05, нешто виша него код конвенцијалног система сагоревања.



Слика 18. Модернизација сагоревања за редукцију емисије NOx применом комбинованих мера на парном котлу блока 2

1. Ложиште; 2. Рециркулациони канал; 3. Вентилаторски млин; 4. Млински инерцијални сепаратор; 5. Реконструисани канали аеросмеше; 6. Нови млазни горионици; 7. Горионик за потпално и потпорно гориво; 8. Канали за секундарни ваздух; 9. Озрачени (улазни) прегрејач свеже паре; 10. Полуозрачени (излазни) прегрејач свеже паре; 11. Млазнице загрејаног ваздуха за догоревање – систем ОФА 1;

12. Копља са млазницама за загрејан ваздух за догоревање – систем ОФА 2; 13. Систем копаља и млазница за убризгавање смеше амонијака и загрејаног ваздуха – мере SNCR

Други део загрејаног ваздуха за догоревање се уводи изнад ложишта кроз систем млазница ОФА 2 (поз. 12 на сл. 18) такође у количини 0,1 од теоријски потребне. На тај начин се, иза места увођења загрејаног ваздуха, врши догоревање преосталих несагорелих гасова и честица угља доспелих из ложишта, уз коефицијент вишка ваздуха од 1,15. Истовремено се са завршетком редукције емисије NO_x врши и размена топлоте са продуката сагоревања на свеже прегрејану пару, посредством грејне површине полуозраченог прегрејача.

На овај начин оствариће се пројектне температуре свеже и накнадно прегрејане паре, уз редукован пројектни капацитет убризгавања воде у хладњаке, и обезбедити максимална продукција парног котла блока 2.

Убризгавањем амонијака помоћу копаља и млазница постављених на коти +51,390 m, систем ОФА 2 (поз. 13 на сл. 18), истовремено са загрејаним ваздухом за догоревање (12) у простор између цеви полуозраченог (излазног) прегрејача свеже паре извршиће се додатна редукција садржаја азотних оксида у продуктима сагоревања и даље догоревање несагорелог горива. Треба свакако напоменути, да ће се помоћу копаља и млазница постићи правилна расподела реагенса у попречном пресеку гасног канала и да се вредност температуре продуката сагоревања на месту постављања копаља мало мења са променом продукције котла. Поменута промена температуре продуката сагоревања у коју се убризгава амонијак је у складу са температурским током при коме је редукција садржаја NO_x најповољнија.

На тај начин, оствариће се квалитетна комбинација поступка селективне некаталитичке редукције са примарним поступком и постићи оптимално смањење садржаја азотних оксида у продуктима сагоревања предметног парног котла уз задржавање његових основних радних параметара и максималне продукције паре.

4.3.1 УТИЦАЈ РЕКОСТРУИСАНОГ ЛОЖНОГ УРЕЂАЈА НА РАД КОТЛА

При сагоревању пројектног угља, за постојећи котао и максималну продукцију паре, укупно убризгавање воде у оба хладњака свеже прегрејане паре износи 14,01 kg/s.

За предложену модификацију система сагоревања и раду котла са наведеним угљевима из копа Дрмно дошло је до значајнијег смањења укупног убризгавања воде у линију свеже прегрејане паре при максималној продукцији котла. Разлог овог смањења убризгавања је снижење температуре продуката сагоревања на улазу у конвективни гасни канал (иза четвртог ступња прегрејача свеже паре) као и смањење укупног протока продуката сагоревања, који је последица смањеног коефицијента вишка ваздуха дуж гасног тракта котла.

Укупно убризгавање воде у линију свеже паре расте при смањењу продукције котла.

Разлог овом порасту је изабран однос озрачених и конвективних прегрејачких грејних површина од стране пројектанта.

За регулацију накнадно прегрејане паре предвиђен је хладњак паре бр. 3, постављен између накнадних прегрејача паре, у који се убризгава вода из одузимања. Како су накнадни прегрејачи паре бр. 1 и бр. 2 конвективног типа, убризгавање у линију накнадно прегрејане паре опада са смањењем продукције котла. Тако, при раду котла са модификованим системом сагоревања са пројектним угљем из копа Дрмно, за максималну продукцију паре, убризгавање воде износи 6,286 kg/s а при продукцији од 735 t/h износи 3,115 kg/s. При сагоревању угља из копа Дрмно горњег квалитета, за максималну продукцију паре, убризгавање воде износи 5,125 kg/s а при продукцији од 735 t/h износи 3,113 kg/s.

При сагоревању пројектног угља из копа Дрмно за постојећи котао, убризгавања воде линију накнадно прегрејане паре су нешто већа, тако да за максималну продукцију паре износи 8,03 kg/s а при продукцији од 735 t/h износи 3,30 kg/s.

4.4 ГАРАНТОВАНИ ПАРАМЕТРИ РЕКОНСТРУИСАНОГ КОТЛА

Након реконструкције ложног уређаја и увођења комбиноване методе за редукцију азотних оксида, котао мора испуњавати све пројектне параметре. Не сме бити нарушена стабилност и поузданост рада, степен корисности котла мора остати исти или већи него пре реконструкције, а притом, емисија азотних оксида треба да буде смањена на $< 170 \text{ Nm}^3/\text{h}$. Пре почетка радова на реконструкцији ложног уређаја котла, дефинисани су параметри који морају да се постигну. То су "гаранцијски параметри" и они ће се мерити и проверавати након покретања котла.

Сви гарантовани параметри доказиваће се при нормалним радним условима термоелектране, т.ј. при граничним условима заснованим на пројектном типу угља и продукцији паре од 1050 t/h.

4.4.1 ГРАНИЧНИ УСЛОВИ

- Температура поновног загревања из хладног стања (CRH) 334° C
- CRH проток 940 t/h
- Температура напојне воде 255° C
- Притисак паре 186 бара
- Притисак поновног загревања 46,1 бара
- Температура на доводу ваздуха 40° C
- Неконтролисани ток ваздуха у котлу 20%
- Садржај ксилита у угљу $\leq 10\%$

4.4.2. Вредност гаранцијских параметара

Параметар	Јединица	Гарантована вредност
Притисак свеже паре на излазу из котла	bar	186
Температура прегрејане паре на излазу из котла	°C	540
Температура секундарне паре на излазу из котла	°C	540
Излазна температура сепаратора	°C	≤ 200
Капацитет млина	t/h	≥ 80
Ефикасност котла са предвиђеним типом угља	%	$\geq 87,8$
Температура на излазу из пећи (макс.)	°C	1,050
Праг емисије (ETV) NO _x (дневни просек)	mg/Nm ³ @ 6 % O ₂ suv	< 170
Праг емисије (ETV) CO (дневни просек)	mg/Nm ³ @ 6 % O ₂ suv	< 200

Табела 3.Вредност гаранцијских параметара при протоку паре од 1050 t/h

У следећој табели приказане су гарантоване вредности емисије азотних оксида посебно након примене примарне и након секундарне методе.

Бр.	Назив		Јединица	Вредност
1.	Остваривање захтеване вредности емисије применом примарних и секундарних мера	Ниво емисије азотних једињења, NO_x , применом само примарних мера	mg/Nm ³	260
		Ниво емисије азотних једињења, NO_x , применом примарних и секундарних мера		169,99
2.	Ниво емисије CO		mg/Nm ³	200

Табела 4. Вредност емисије азотних оксида

Осим горе наведених параметара, битан податак за испуњење гаранцијских услова представља потрошња електричне енергије и реагенса, што је приказано у табели бр.5.

	Параметар	Јединица	Вредност
1.	Врста реагенса: Амонијачна вода	—	Амонијачна вода у концентрацији између 24,5 и 24,9% тежине
2.	Потрошња реагенса при протоку свеже паре од 1050 t/h и при емисији азотних једињења испод 170 mg/m ³	kg/h	775
3.	Потрошња електричне енергије потрошача за редукцију азотних једињења, укупна	kWh/h	121
4.	Потрошња електричне енергије потрошача за редукцију азотних једињења, континуална	kWh/h	68
5.	Потрошња електричне енергије за редукцију азотних једињења, повремених потрошача	kWh/h	53

Табела 5. Очекиване вредности потрошње

5. ЗАКЉУЧАК

Модификација процеса сагоревања на парном котлу блока 2 термоелектране Костолац Б, подразумева увођење комбинованих мера за редукцију азотних оксида (NO_x). Одабрана је примена примарних и секундарних некаталитичких мера.

Примарне мере у циљу редукције садржаја NO_x у продуктима сагоревања на предметном котлу, захтевају реконструкцију свих осам постојећих уређаја за припрему угљеног праха у делу изнад вентилаторског млина, тачније од млинског сепаратора до горионика и ложишта. Предложена је замена постојећег млазног горионика који има четири етаже увођења угљеног праха новим, са две етаже. Коефицијент вишка ваздуха у овом делу је 0,95 од теоретски потребне количине.

Преостали ваздух за догоревање доводи се у два нивоа по висини ложишта, системима ОФА 1 и ОФА 2. Систем млазница ОФА 1 је постављен на сва четири ложишна зида, на коти +37,5m, у области озрачног прегрејача свеже паре. Систем млазница ОФА 2 је постављен на два наспрамна зида на коти +51,4m, практично у првој грејној површини по току продуката сагоревања након напуштања ложишта, у излазном прегрејачу свеже паре. Коефицијент вишка ваздуха након увођења топлог ваздуха системом ОФА 1 (на крају ложишта) има вредност 1,05. Даље, системом ОФА 2, практично изнад ложишта котла, доводила би се преостала количина ваздуха за догоревање несагорелог горива (гасова и угљеника у летећем праху). После завршеног догоревања коефицијент вишка ваздуха би износио 1,15.

На овај начин, применом примарних мера, емисија NO_x би се редуковала на око 195mg/Nm³. Додатно смањење емисије азотних оксида вршиће се применом селективне некаталитичке методе (SNCR).

Поступак SNCR се заснива на селективној редукцији азотних оксида без присуства катализатора. У циљу постизања што веће редукције садржаја азотних оксида, потребно је смешу или раствор реагенса убризгати у димне гасове у препорученом температурском подручју (870°C до 1020°C). Ако се реагенс убризга у још ужем температурском подручју, од 955°C до 1020°C, у тачно одређеној количини, оствариће се квалитетнија редукција садржаја азотних оксида, уз незнатну емисију амонијака у околину.

За постојеће ложиште парног котла блока 2, као најпогодније, изабрано је убризгавање смеше реагенса, амонијака и загрејаног ваздуха за догоревање, у продукте сагоревања са високом концентрацијом азотних оксида одговарајуће температуре, кроз систем

млазница ОФА. Описано решење за примену примарних мера омогућује да се амонијум хидросид убризга у гасни тракт котла кроз копља и млазнице система ОФА 2, заједно са загрејаним ваздухом за догоревање.

Применом комбинованих мера на овај начин (SNCR кроз систем млазница ОФА 2 заједно са примарним мерама), могуће је додатно смањити почетни садржај азотних оксида од $193\text{mg}/\text{Nm}^3$, који је постигнут само примарним мерама, до вредности од $148\text{mg}/\text{Nm}^3$. Након примене мера SNCR помоћу система млазница ОФА 2, температура на излазу из ложишта је остала непромењена у односу на температуру добијену само применом примарних мера. Проток воденог раствора амонијум хидроксида, у смеси са ваздухом за догоревање, у овом случају износи 384 kg/h , а тако мала количина реагенса свакако неће утицати на промену температуре продуката сагоревања.

Након свега, може се закључити да решење са комбинованим поступком задовољава жељени критеријум рада са ниским садржајем азотних оксида у продуктима сагоревања а да се при томе не наруше параметри рада предметног парног котла. Резултати испитивања су показали, да вредност садржаја азотних оксида од $193\text{mg}/\text{Nm}^3$, постигнута само примарним мерама са два нивоа увођења додатног ваздуха за догоревање, ОФА 1 и ОФА 2, задовољава прописане граничне вредности емисије од $200\text{mg}/\text{Nm}^3$. Додатном мером SNCR, помоћу млазница ОФА 2, могуће је додатно смањити садржај азотних оксида до вредности од $148\text{mg}/\text{Nm}^3$, што ће задовољити и строжије критеријуме који се очекују у будућности ($<170\text{mg}/\text{Nm}^3$).

Температура продуката сагоревања на крају ложишта износила би 1075°C за пројектни угаљ и максималну продукцију паре, што је практично иста температура која се постиже при раду котла са постојећим, конвенционалним системом сагоревања.

6. ЛИТЕРАТУРА

1. *Mitsubishi hitachi power systems europa и Феромонт инжењеринг д.о.о:*
Пројекат Костолац Б2 De NOx
2. Скрипта: *Енергија и окружење, превод са енглеског проф. др. Н. Лукић редовни професор, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу*
3. Гулич, М., Бркић, Љ., Живановић, Т., Стојаковић, М: *Анализа постројења за припрему угљеног праха и ложишта парног котла ТЕ Дрмно*
4. Живановић, Т., Туцаковић, Д., Бркић, Љ., Ступар, Г: *Студија адаптације парног котла блока I у ТЕ Костолац Б*
5. Directive 2010/75/EU European Union: *Limit of emisions of harmful substances into the air from large furnances*
6. *Уредба о граничним вредностима емисија загађујућих материји у ваздуху,*
Службени гласник РС бр.71 од 24.11.2010.
7. Радован, П., Ковачевић, П., Рајић, Р: *Погонско упутство за котловско постројење, Термоелектрана " Костолац Б"*