

ИСПИТИВАЊЕ УТИЦАЈА ПРОМЕНЕ СИСТЕМА САГОРЕВАЊА НА ПРОЦЕСЕ У ПАРНОМ КОТЛУ У ТЕ УГЉЕВИК

Горан Ступар^{*а}, Драган Туцаковић^{*}, Огњен Стаменковић^{*}, Лука Петровић^{**},
Боривоје Вујичић^{**}, Жарко Новаковић^{***}, Жељко Милановић^{***}

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

^{**} *М.Х. Електропривреда Републике Српске, 89101 Требиње, Република Српска, Босна и
Херцеговина (387-59) 277-101,*

^{***} *Термоелектрана Угљевик, М.Х. Електропривреда Републике Српске,
76330 Угљевик, Република Српска, Босна и Херцеговина (387-55) 774-600*

АБСТРАКТ: У раду је приказано техничко решење модернизације у циљу повећања ефикасности парног котла ТЕ Угљевик које подразумева реорганизацију система сагоревања. Ефикаснији рад ложишта може се остварити заменом постојећих млазних горионика, смањењем броја етажа горионика као и организацијом тангенцијалног сагоревања. Пламен формиран у облику тубуса око два централна ложишног вртлога обезбеђује већу количину топлоте која се предаје у ложишту, мање прљање његових екранских зидова па самим тим и нижу средњу температуру продуката сагоревања на његовом излазу. Како изабрана реорганизација утиче на повишење температуре свеже прегрејане паре и снижење температуре накнадно прегрејане паре, предложено је и смањење површине полуозраченог прегрејача свеже прегрејане паре и повећање површине другог ступња прегрејача накнадно прегрејане паре. Како услед реорганизације система сагоревања може доћи до промене топлотног оптерећења испаривача смештеног у ложишту, у раду је приказана провера рада парног котла при новим радним условима. Ради анализе ефеката модернизације на рад парног котла у целини, извршено је прорачунско спрезање диференцијалних математичких модела процеса сагоревања угљеног праха, струјања, зрачења продуката сагоревања и настајања азотних оксида са интегралним термичким прорачунским процедурама. Овакав прорачунски систем омогућава поуздано предвиђање радних карактеристика парног котла у новим радним условима сагоревања, 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 Угљевик за постојећи и реорганизовани систем сагоревања. Приказани систем прорачуна за рад котла је верификован мерењем извршеним на предметном објекту у постојећим радним условима.

Кључне речи: парни котло, ложиште, систем прорачуна, ефикасност.

INFLUENCE OF THE COMBUSTION SYSTEM CHANGE ON PROCESSES IN THE STEAM BOILER IN TPP UGLJEVIK

Goran Stupar^{*а}, Dragan Tucaković^{*}, Ognjen Stamenković^{*}, Luka Petrović^{**},
Borivoje Vujičić^{**}, Žarko Novaković^{***}, Željko Milanović^{***}

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

^{**} *M.H. Elektroprivreda Republike Srpske, 89101 Trebinje, Republika Srpska,
Bosna i Hercegovina, (387-59) 277-101*

^{***} *Thermal power plant Ugljevik, M.H. Elektroprivreda Republike Srpske,
76330 Ugljevik, Republika Srpska, Bosna i Hercegovina, (387-55) 774-600*

ABSTRACT: The paper presents a technical solution for modernization with the aim of increasing the efficiency of the steam boiler of TPP Ugljevik, which implies the reorganization of the combustion system. More efficient operation of the furnace can be achieved by replacing the existing burners, reducing the number of burner levels as well as the organization of tangential combustion. The flame formed in the shape of a tube around the two central combustion vortices provides a larger amount of heat transferred to the combustion furnace, less fouling of its screen walls and thus a lower average temperature of the combustion products at its outlet. As the chosen reorganization affects the increase of the temperature of the superheated steam and the decrease of the temperature of the reheated steam, it has been proposed to reduce the area of the semi-irradiated superheater and increase the area of the second stage reheater. Taking into consideration that the reorganization of the combustion system may lead to the change of the thermal load of the evaporator located in the furnace, the paper presents the work of the steam boiler operation under new operating conditions. In order to analyze the effects of modernization on the operation of the steam boiler as a whole, an estimative coupling of differential mathematical models of coal combustion processes, flow, radiation of combustion products and formation of nitrogen oxides with integral thermal calculation procedures has been performed. This calculation system enables reliable prediction of operating characteristics of the steam boiler in new operating conditions of combustion, and its application helps assess the quality of the boiler in terms of how effective, efficient, safe and environmentally friendly its operating mode is. In this way, it is possible to form a comprehensive description of the operating mode of the steam boiler. Based on the above, calculations of the steam boiler of TPP Ugljevik have been performed both for the existing and the reorganized combustion system. The presented system of boiler operation calculations was verified by measurements performed on the object in question in existing operating conditions.

Key words: steam boiler, furnace, calculation system, efficiency.

1. УВОД

У ТЕ Угљевик, од 1985. Године, је у раду парни блок снаге 300 MW који има више од 200.000 радних сати на мрежи. Парни блок је на крају свог радног века а због дотрајалости опреме и коришћења најчешће угља повећане склоности ка зашљакивању и прљању у експлоатацији ради са мањом снагом, повећаним бројем непланских испада и честих застоја због потребе за чишћењем наслага наталожених на грејним површинама.

Да би се проверио рад парног блока, одредили главни проблеми при експлоатацији и поставиле смернице за повећање његове расположивости, снаге и ефикасности потребно је дефинисати математичке моделе сложених струјно-термичких процеса путем којих је, уз спровођење већег броја контролних прорачуна, могуће извршити анализу постојећег стања постројења и дати предлоге мера за побољшање његовог рада у целини.

У циљу испитивања могућности примене мера реорганизације процеса сагоревања као и анализе њихових ефеката на рад парног котла у целини, извршено је моделирање процеса сагоревања лигнита у ложишту парног котла ТЕ Угљевик. Свеобухватни опис процеса у ложишту енергетског парног котла за сагоревање угљеног дефинисан је математичким моделом зрачећег реактивног двокомпонентног турбулентног тока заједно са подмоделом формирања горивних и термичких оксида азота [1]. Овакав сложени математички модел повезан је са процедурама термичког прорачуна у јединствени систем прорачуна за анализу рада парног котла. Дефинисани систем омогућава прорачуне са променом утицајних параметара у најширим границама па су на овакав начин извршени прорачуни радних режима парног котла за пројектни и након предложене модернизације реорганизовани систем сагоревања.

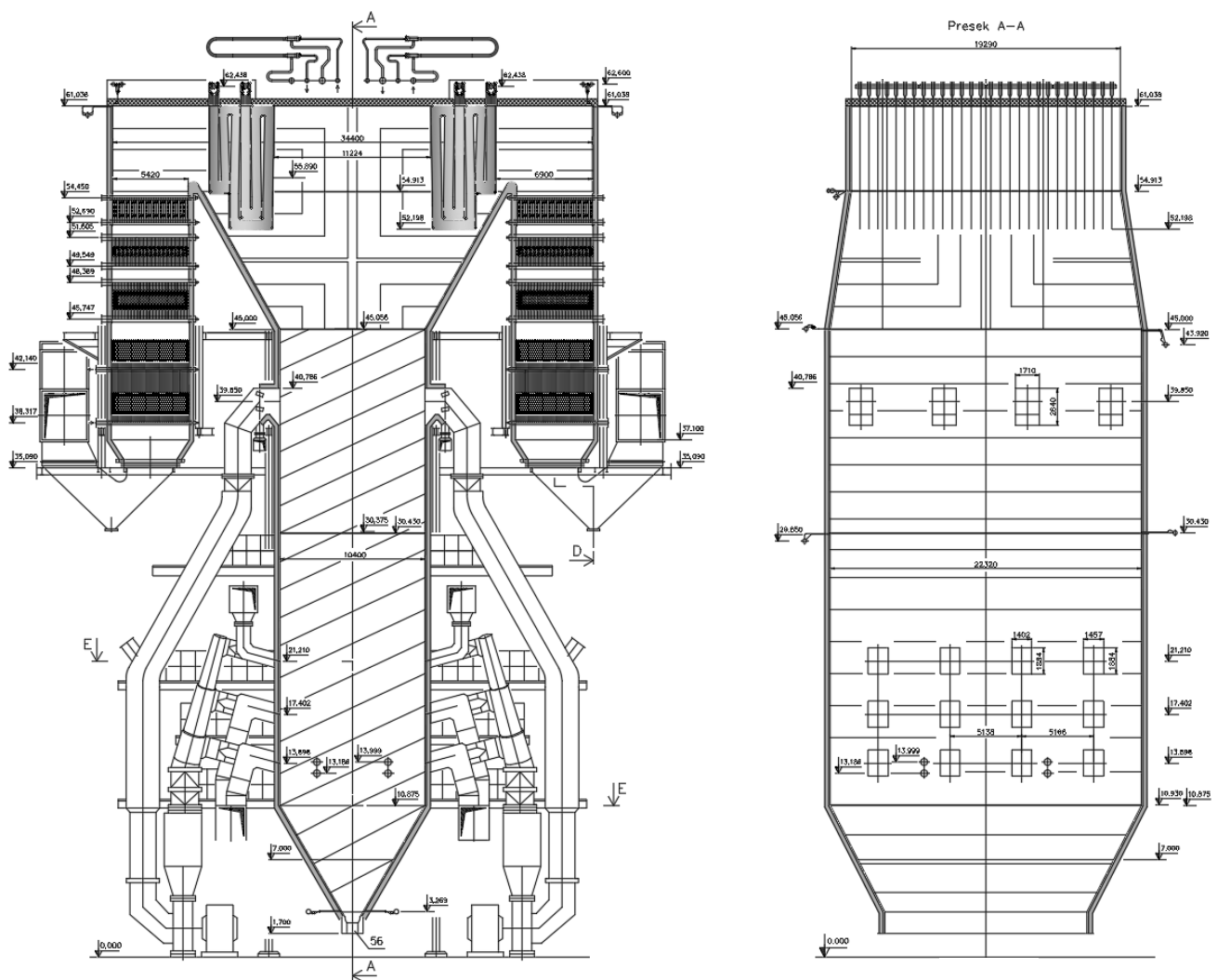
Промена настале у раду разматраног парног котла након уведених мера приказани су релевантним резултатима система прорачуна у случају промене његовог оптерећења за

гориво топлотне моћи које се тренутно користи у електрани а у варијантама веће и мање склоности ка зашљакивању и прљању грејних површина.

Извршени прорачуни, валидирани мерењима на предметном постројењу, показали су највеће проблеме у његовом раду на основу чега су, за угљаљ који ће се користити у наредном периоду, предложене додатне мере и реконструкције котловског постројења а у циљу повећања садашње продукције прегрејане паре пројектних параметара.

2. ТЕХНИЧКИ ОПИС ПАРНОГ КОТЛА

Разматрани парни котло, приказан на слици 1, састоји се од загрејача воде, испаривача смештеног у ложишту, три ступња прегрејача свеже прегрејане паре и два ступња прегрејача накнадно прегрејане паре. Регулација температуре свеже и накнадно прегрејане паре врши се бифлуksom и убризгавањем воде у хладњаке постављене између одговарајућих грејних површина. Котло је опремљен са осам индивидуалних постројења за припрему угљеног праха, конципираних као модификована постројења са директним удубавањем и сушењем по затвореном процесу. Свако постројење за припрему угљеног праха има по један млазни горионик који је по висини подељен у три етаже, које су према ложишном левку нагнуте под углом од 15° . У ложишту котла, правоугаоног попречног пресека, на оба бочна зида постављено је по четири горионика. Два централна млазна горионика су постављена наспрамно, а друга два крајња су благо заокренута, за $13^\circ 30'$ у хоризонталној равни, ка средишњој оси ложишта.



Слика 1. Парни котло у ТЕ Угљевик [8];

Пројектне карактеристике парног котла, за гарантни угаљ доње топлотне моћи од 10467 kJ/kg, су:

Номинална снага блока	$P = 300$	MW
Максимална трајна продукција свеже прегрејане паре	$D = 1000$	t/h
Притисак свеже прегрејане паре	$p_s = 25,0$	MPa
Температура свеже прегрејане паре	$t_s = 545$	°C
Продукција накнадно прегрејане паре	$D_{rs} = 800$	t/h
Притисак накнадно прегрејане паре	$p_{rs} = 3,84$	MPa
Температура накнадно прегрејане паре	$t_{rs} = 545$	°C
Притисак паре за накнадно прегревање	$p_r = 4,19$	MPa
Температура паре за накнадно прегревање	$t_r = 306$	°C
Притисак напојне воде	$p_{nv} = 30,8$	MPa
Температура напојне воде	$t_{nv} = 275$	°C
Степен корисности парног котла	$\eta_k = 86 \pm 0,5$	%

Кроз вишетажне млазне горионике за угљени прах у ложиште парног котла уводе се аеросмеша и секундарни ваздух. У зони горионика врши се њихово интензивно мешање, паљење и сагоревање честица угљеног праха. У процесу сагоревања настају продукти сагоревања високе температуре (топлотни предајник) који даље струје кроз гасни тракт котла предајући енергију току вода-пара (топлотни пријменик) посредством грејних површина. Продукти сагоревања угљеног праха настали у зони горионика струје вертикално навише предајући зрачењем количину топлоте мембранским цевима које екранишу зидове ложишта.

Услед „Г” облика гасног тракта предметног парног котла охлађени продукти саоревања напуштају ложиште тако што се деле на два дела и улазе у два симетрично постављена хоризонтална гасна међуканала у коме су постављена два полуозрачена прегрејача свеже прегрејане паре. Зидови и плафон хоризонталног гасног међуканала екранисани су мембранским цевима које по току пријемника топлоте представљају наставак екранских цеви средњег и горњег радијационог дела ложишта и чине допунске грејне површине у овом делу гасног тракта. На крају хоризонталног гасног међуканала оба тока продуката сагоревања скрећу надоле и улазе у два вертикална конвективна гасна канала симетрично постављена у односу на вертикалну осу котла. По току продуката сагоревања у овим гасним каналима постављени су редом конвективни (излазни) прегрејачи свеже прегрејане паре 3, конвективни (излазни) прегрејач накнадне паре 2, конвективни прегрејач накнадне паре 1 и два пакета загрејача воде. Све наведене грејне површине постављене су у оба гасна канала симетрично у односу на вертикалну осу ложишта. Вертикални конвективни гасни канали нису екранисани цевима додатних грејних површина.

Након предате количине топлоте у вертикалним конвективним гасним каналима продукти сагоревања доспевају у левкове за летећи пепео, скрећу и улазе у два хоризонтална лимена димна канала, постављена непосредно уз вертикалне конвективне гасне канале котла. Након тога се охлађени димни гасови, из два гасна канала деле и уводе у три колоне цевног загрејача ваздуха каскадног типа. У загрејачу ваздуха се продукти сагоревања хладе до коначне излазне температуре и након отпрашивања одводе у атмосферу.

3. РЕЗУЛТАТИ И АНАЛИЗЕ СИСТЕМА ПРОРАЧУНА ПАРНОГ КОТЛА

3.1. Систем прорачуна радних режима парног котла

У циљу испитивања варијантних решења организације процеса у ложишту и тиме изазваних ефеката на рад предметног парног котла у целини извршено је моделирање спрегнутих сложених процеса у енергетском парном котлу блока ТЕ Угљевик, за радне услове са новим стањем ложних уређаја.

За потребе предвиђања рада сложеног котловског постројења, независно од концепције сагоревања примењеног у његовом ложишту, дефинисан је алгоритам повезивања интегралних прорачуна котла и нумеричких прорачуна елемента чији се рад детаљније анализира. Моделирање ових процеса извршено је применом програмског система који обухвата диференцијални и интегрални математички модел са њиховом интеракцијом. Овакав систем омогућава шири приказ свих релевантних стања струја које учествују у процесима кретања, сагоревања и преношења количине топлоте у ложишту енергетског парног котла при сагоревању угљеног праха у лету. Овакав модел верификован је и у целини приказан у [1].

Примењени математички модел описује формирање и кретање зрачећег реактивног вишекомпонентног турбулентног тока и пружа детаљан увид у овако комплексне и спрегнуте процесе који се истовремено одвијају у зонама сагоревања ложишта парног котла. У укупни модел прикључен је и математички подмодел формирања и деструкције горивних и термичких азотних оксида (NO_x). Дефинисани систем омогућава прорачуне са променом утицајних параметара у најширим границама (квалитет угља, запрљање грејних површина, количине и брзине аеросмеше и ваздуха, рецикулације дела продуката сагоревања, оријентацију горионика) [2].

На описани начин систем омогућава праћење рада сложеног енергетског система и испитивање мера које утичу на његов рад [3-4]. Применом наведеног система извршени су одговарајући прорачуни постојећег ложишта са пројектним конвенцијалним системом сагоревања у оквиру ТЕ Угљевик и предложени систем реорганизације процеса у ложишту.

Анализом добијених резултата могуће је дати смернице за побољшање процеса у циљу повећања његове снаге, ефикасности, поузданости и еколошки прихватљивог начина рада. Описана процедура примењена је при испитивању нове организације сагоревања у ТЕ Угљевик која подразумева горионике нове конструкције и тангенцијалну организацију надстехиометријског сагоревања у ложишту па је описани поступак коришћен за избор геометрије горионика, избора места и угла њиховог постављања [9].

3.2. Резултати система прорачуна котла

На основу наведених модела, извршен је прорачун рада у пројектним условима (НР), као и са предложеним реорганизованим системом сагоревања, када се у ложишту формирају два пламена око истосмерних централних вртлога, оптималних са аспекта симетрије температурског поља и одсуства посебно неповољних зона високе локалне температуре у близини екранских зидова, што је приказано у тест случајевима TC1-TC4. За овако изабрани систем спроведени су CFD прорачуни рада парног котла за снагу блока од 260 MW, при искљученим и укљученим загрејачима високог притиска (ЗВП) и 300 MW са укљученим загрејачима високог притиска, а сваки од тестираних радних режима испитан је при коришћењу угља веће и мање склоности ка прљању чији је састав дат у табели 1 и који је по топлотној моћи близак гарантованом. Валидација модела је извршена за рад котла при тренутном радном стању.

Контролни термички прорачуни спроведени су за постојећи парни котао, у циљу одређивања температура предајника и пријемника топлоте на улазу и излазу грејних површина, у складу са приказаним топлотним билансом у табели 2. Термички прорачуни, приказани у изводу у табели 3, извршени по Нормативном методу [5], док су запрљања и топлотне ефикасности појединих грејних површина усклађене са тренутним радом котла. При прорачуну процеса у ложишту, прерасподела угљеног праха, транспортног флуида и загрејаног ваздуха по етажама (нивоима) горионика усвојена је на основу мерења приказаних у [6] и мерења након спроведене реконструкције раздвајача аеросмеше 2020. године која подразумева да се аеросмеша дели у масеном односу 51:30:19 а ваздух се у зону горионика доводи у количини од 24 % већој од теоретске за снагу блока од 260 MW коју је могуће остварити са тренутним квалитетом угља и пројектним системом сагоревања.

Геометријске карактеристике грејних површина усвојене су на основу расположиве техничке документације [7].

Табела 1. Техничка и елементарна анализа лигнита који се тренутно користи у електрани

Назив	Ознака	Јединица мере	Вредност
ТЕХНИЧКА АНАЛИЗА			
Садржај минералних материја	A^r	%	27,16
Садржај влаге	W^r	%	31,70
Садржај укупног сумпора	S_u^r	%	4,46
Садржај сумпора у пепелу	S_A^r	%	2,53
Садржај волатила у радној маси	V^r	%	29,37
Садржај сагорљивих материја	G^r	%	41,14
Садржај кокса	K^r	%	38,93
Садржај фиксног угљеника	C_{fix}	%	11,77
Доња топлотна моћ	H_d	%	10341
ЕЛЕМЕНТАРНА АНАЛИЗА			
Садржај угљеника	C^r	%	29,13
Садржај водоника	H^r	%	2,05
Садржај кисеоника	O^r	%	7,22
Садржај азота	N^r	%	0,81
Садржај сагорљивог сумпора	S_g^r	%	1,93

Ради могућности остваривања упоредне анализе у табелама извода топлотног биланса и термичког прорачуна приказани су радни режими са новим системом сагоревања и постојећом снагом од 260 MW као и рад са пројектном снагом блока од 300 MW која пре предложених мера промене система сагоревања није могла да се оствари.

Анализом приказаних резултат може се уочити да се реорганизацијом постижу ниже температуре продуката сагоревања на излазу из ложишта, веће снаге и ефикасности процеса. Потребно је напоменути да из ових разлога предложена реорганизација система подразумева и увођење додатне грејне површине турбинског економајзера (ТуЕ), смањење полуозраченог прегрејача свеже прегрејане паре и повећање површине другог прегрејача накнадно прегрејане паре. Реконструкције конвективног прегрејача свеже прегрејане паре, првог ступња прегрејача некнадно прегрејане паре и оребреног загрејача воде нису неопходне. На овакав начин би се омогућило да температуре продуката сагоревања испред оребреног загрејача воде буду блиске пројектним. Смањена топлотна ефикасност постојећег оребреног загрејача воде довела је до потребе за постављањем додатног загрејача напојне воде (ТуЕ), који би се поставио уместо трећег ступња загрејача ваздуха. Постављањем турбинског економајзера и ремонтом првог и другог ступња загрејача ваздуха у циљу њиховог заптивања, снизила би се температура продуката сагоревања на излазу из парног котла чиме би се значајно побољшао његов степен корисности. Овакво снижавање температуре продуката сагоревања на излазу из котла омогућило би да блок ради са укљученим регенеративним загрејачима високог притиска. Допунски је потребно напоменути, да би при коришћењу угља са већом склоношћу ка прљању котловских грејних површина, при снагама блока већим од 280 MW, температура продуката сагоревања испред конвективног прегрејача свеже прегрејане паре, на излазу из скретне коморе, прелазила препоручену максималну вредност од 820 °C, која представља заштиту у раду котла од повећаног прљања његових грејних површина и касније обуставе рада ради њиховог чишћења.

За снагу блока од 300 MW, са укљученим загрејачима високог притиска, температура продуката сагоревања на излазу из котла износила би 187 °C, степен корисности котла 87,16 % а температура продуката сагоревања испред конвективног прегрејача свеже паре износила би 836 °C (зона повећане опасности од зашљакивања и прљања котловских грејних површина). Све ово указује да би, при раду котла са угљем који има већу склоност ка прљању грејних површина, могла да се оствари максимална снага блока од 280 MW па је ово оптерећење (ТС3а*) приказано у табели 4. При коришћењу угља мање склоности ка прљању могуће је безбедно остварити пројектну снагу од 300 MW са ефикасношћу од 87,67 %.

Табела 2. Изводи топлотног биланса котла

Ред. број	Назив	Ознака	Јединица мере	Снага блока [MW]					
				260			300		
				без ЗВП		са ЗВП			
				НР*	НР**	ТС1*	ТС2**	ТС3*	ТС4**
1.	Доња топлотна моћ угља	H_d	kJ/kg	10341	10341	10341	10341	10341	10341
2.	Коефицијент вишка ваздуха на крају ложишта	α_l''	-	1,240	1,240	1,240	1,240	1,200	1,200
3.	Прираштај коефицијента вишка ваздуха у ложишту	$\Delta\alpha_l$	-	0,150	0,150	0,110	0,110	0,080	0,080
4.	Прираштај коефицијента вишка ваздуха у млинском постројењу	$\Delta\alpha_m$	-	0,258	0,258	0,140	0,140	0,120	0,120
5.	Коефицијента истицања ваздуха из загрејача ваздуха у гасни тракт	$\Delta\alpha_{zv}$	-	0,216	0,216	0,072	0,074	0,054	0,054
6.	Коефицијент вишка ваздуха на излазу из котла	α_{iz}	-	1,686	1,686	1,452	1,452	1,374	1,374
7.	Температура излазних димних гасова	t_{iz}	°C	223	208	185	178	187	179
8.	Губитак у излазним гасовима	q_2	%	15,44	14,28	11,22	10,73	10,34	10,34
9.	Губитак услед хемијске непотпуности сагоревања	q_3	%	0	0	0	0	0	0
10.	Губитак услед механичке непотпуности сагоревања	q_4	%	2,08	2,08	2,08	2,08	1,80	1,80
11.	Губитак услед спољашњег расхлађивања	q_5	%	0,14	0,14	0,14	0,14	0,12	0,12
12.	Губитак услед физичке топлоте шљаке	q_6	%	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
13.	Степен корисности котла	η_k	%	82,27	83,43	86,49	86,98	87,16	87,67
14.	Производња свеже прегрејане паре	D	kg/s	207,50	207,50	214,93	214,93	251,50	251,50
15.	Температура свеже прегрејане паре	t_s	°C	545	545	545	545	545	545
16.	Притисак свеже прегрејане паре	p_s	bar	243,53	243,53	244,12	244,12	247,36	247,36
17.	Температура напојне воде	t_{nv}	°C	164,3	164,3	266,3	266,3	270,5	270,5
18.	Притисак напојне воде	p_{nv}	bar	274,21	274,21	275,97	275,97	290,96	290,96
19.	Производња накнадно прегрејане паре	D_r	kg/s	203,50	203,50	191,65	191,65	224,95	224,95
20.	Температура накнадно прегрејане паре	t_{rs}	°C	545	538	545	545	545	545
21.	Притисак накнадно прегрејане паре на излазу из котла	p_{rs}	bar	34,80	34,80	33,00	33,00	38,28	38,28
22.	Температура паре за накнадно прегревање	t_r	°C	304,4	304,4	285,4	285,4	298,7	298,7
23.	Притисак паре за накнадно прегревање	p_r	bar	37,40	37,40	34,52	34,52	40,38	40,38
24.	Количина топлоте пренесена у ТУЕ	Q_{TUE}	MW	-	-	35,1	35,1	41,1	41,1
25.	Укупна количина топлоте искоришћена у парном котлу	Q_{pk}	MW	659,621	656,408	618,236	618,236	712,938	712,938
26.	Потрошња горива	B	kg/s	76,434	75,005	68,568	68,186	78,468	78,010

* Рад котла са угљем са већом склоношћу ка зашљакивању;

** Рад котла са угљем са мањом склоношћу ка зашљакивању;

Табела 3. Изводи термичких прорачуна за постојећи и реорганизовани систем сагоревања

Ред. број	Назив	Ознака	Јединица мере	Снага блока [MW]					
				260			300		
				без ЗВП		са ЗВП			
				НР*	НР**	ТС1*	ТС2**	ТС3*	ТС4**
Топлотни предајник (димни гасови)									
1.	Температура димних гасова на излазу из ложишта	t_1''	°C	1044	968	919	886	957	922
2.	Температура димних гасова иза полуозраченог прегрејача паре	t_1	°C	876	815	821	791	860	828
3.	Температура димних гасова испред конвективног прегрејача свеже паре	t_2	°C	852	791	799	771	836	806
4.	Температура димних гасова испред 2. ступња прегрејача накондно прегрејане паре	t_3	°C	778	723	734	703	763	729
5.	Температура димних гасова испред 1. ступња прегрејача накондно прегрејане паре	t_4	°C	725	676	683	656	708	678
6.	Температура димних гасова испред загрејача воде	t_5	°C	623	589	592	578	609	593
7.	Температура димних гасова испред тур. загрејача воде (ТУЕ)	t_6	°C	-	-	372	361	385	372
8.	Температура димних гасова испред загрејача ваздуха	t_7	°C	351	326	305	294	313	301
9.	Температура димних гасова на излазу из котла	t_{iz}	°C	223	208	185	178	187	179
Топлотни пријемник (свежа прегрејана пара)									
10.	Температура напојне воде	t_{nv}	°C	164,3	164,3	266,3	266,3	270,5	270,5
11.	Температура воде на излазу из загрејача воде	t_{nviz}	°C	335	326	362	360	363	361
12.	Температура медијума на излазу из НРД 1	t_{NRDi}	°C	391	391	398	399	403	404
13.	Температура медијума на излазу из НРД 2	t_{NRD2i}	°C	399	399	415	419	417	421
14.	Температура паре на излазу из СРД	t_{SRDi}	°C	415	423	446	455	445	452
15.	Температура паре на излазу из ВРД	t_{VRDi}	°C	428	441	469	478	466	474
16.	Количина топлоте пренесена у бифлуксу	Q_{BIF}	MW	34,772	46,133	47,074	56,943	45,738	57,717
17.	Температура паре на улазу у конвективни прегрејач	t_{KPPu}	°C	493	497	502	500	499	497
18.	Температура паре на излазу из конвективног прегрејача	t_s	°C	545	545	545	545	545	545
Топлотни пријемник (накондно прегрејана пара)									
19.	Температура паре на улазу у 2. ступањ накондно нак. прег. паре	t_{KPP2u}	°C	491	493	489	495	485	491
20.	Температура паре на излазу из 2. ступња нак. прег. паре	t_{rs}	°C	545	538	545	545	545	545

* Рад котла са угљем са већом склоношћу ка зашљакивању;

** Рад котла са угљем са мањом склоношћу ка зашљакивању;

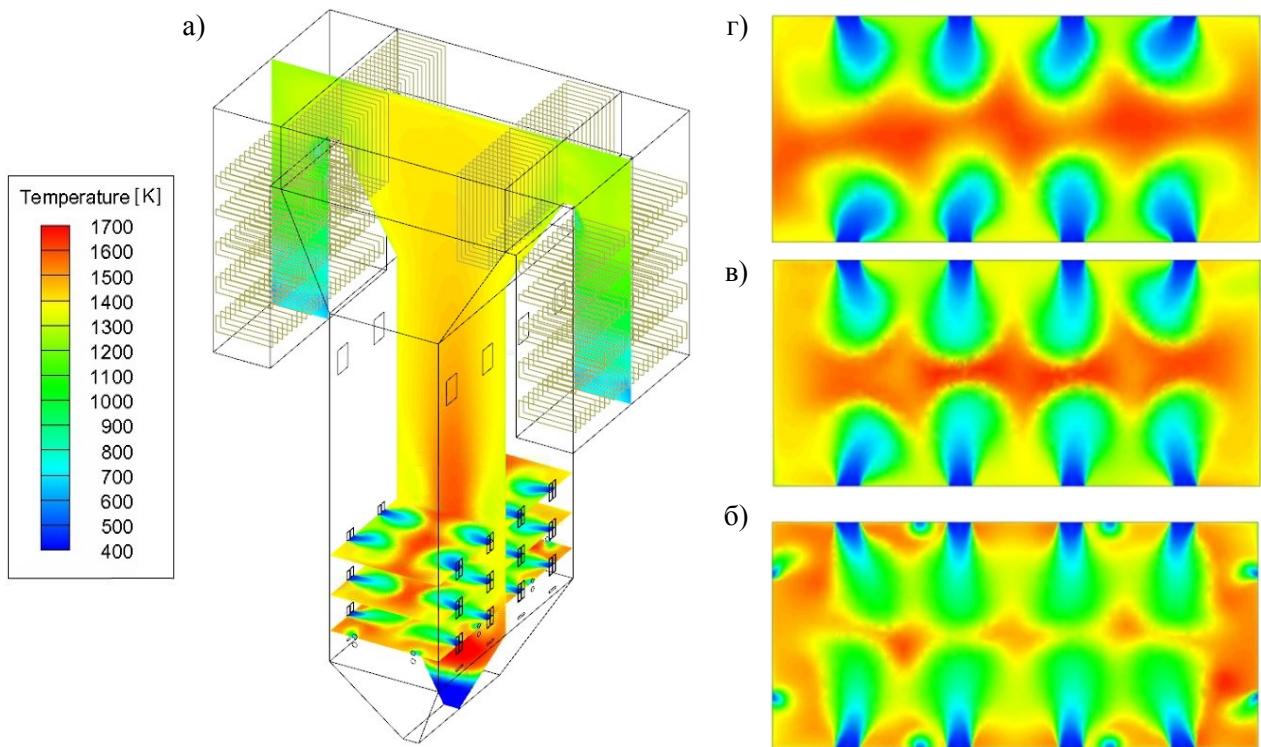
3.3. Анализа резултата система прорачуна котла

На основу наведених модела, извршени су контролни CFD прорачуни ложишта за снагу блока од 260 MW са искљученим загрејачима високог притиска при сагоревању угља са већом (HP^*) и мањом (HP^{**}) склоношћу ка прљању грејних површина котла, доње топлотне моћи 10341 kJ/kg.

Резултати контролних CFD прорачуна за ложиште и проширени домен скретне коморе са конвективним гасним каналом, за постојећи конвенционални систем сагоревања и рад са угљем веће склоности ка прљању, као најнеповољнији радни режим, представљени су посредством одговарајућих температурских и поља концентрације кисеоника и угљен-моноксида. Основни резултати ових прорачуна приказани су у табели 4 а карактеристична поља на сликама 2 до 5.

На сликама 2 и 3 приказана су температурска поља у средишњим уздужним и карактеристичним попречним пресецима котла. На уздужним пресецима се може приметити да је термички градијент мали, односно, да температура са стране продуката сагоревања, због велике задржаности екранских зидова, у вертикалном правцу споро опада. Попречни пресеци сугеришу да се висока температура сагоревања јавља у средишњем простору између бочних зидова ложишта па се на овај начин формира пламена завеса специфичног облика, састављена од три призматична стуба (сегмента), као што се види на слици 10. Прорачуни су показали да су бочни зидови приближно једнако озрачени као и предњи и задњи зид. Анализом температурског поља у осним попречним пресецима горионика могу се уочити изражено повишене температуре у областима предњег и задњег зида ложишта која се креће у опсегу између 1230 °C и 1280 °C. Ова појава је последица појаве вртлога у угловима главне зоне сагоревања па се, на овај начин, један део угљеног праха лоцира у мртвим зонама између крајњих горионика и предњег и задњег зида што локално повишава температуру. На слици 3 се лако може уочити да су високе температуре, до 1180 °C, присутне уз предњи и задњи зид и у горњим деловима ложишта све до коте 38,5 m. Највише температуре продуката сагоревања уз бочне зидове се јављају у доњим деловима ложишта у зонама испод горионика. Зоне овако повишених температура, представљају најосетљивије делове екранских зидова у погледу зашљакивања.

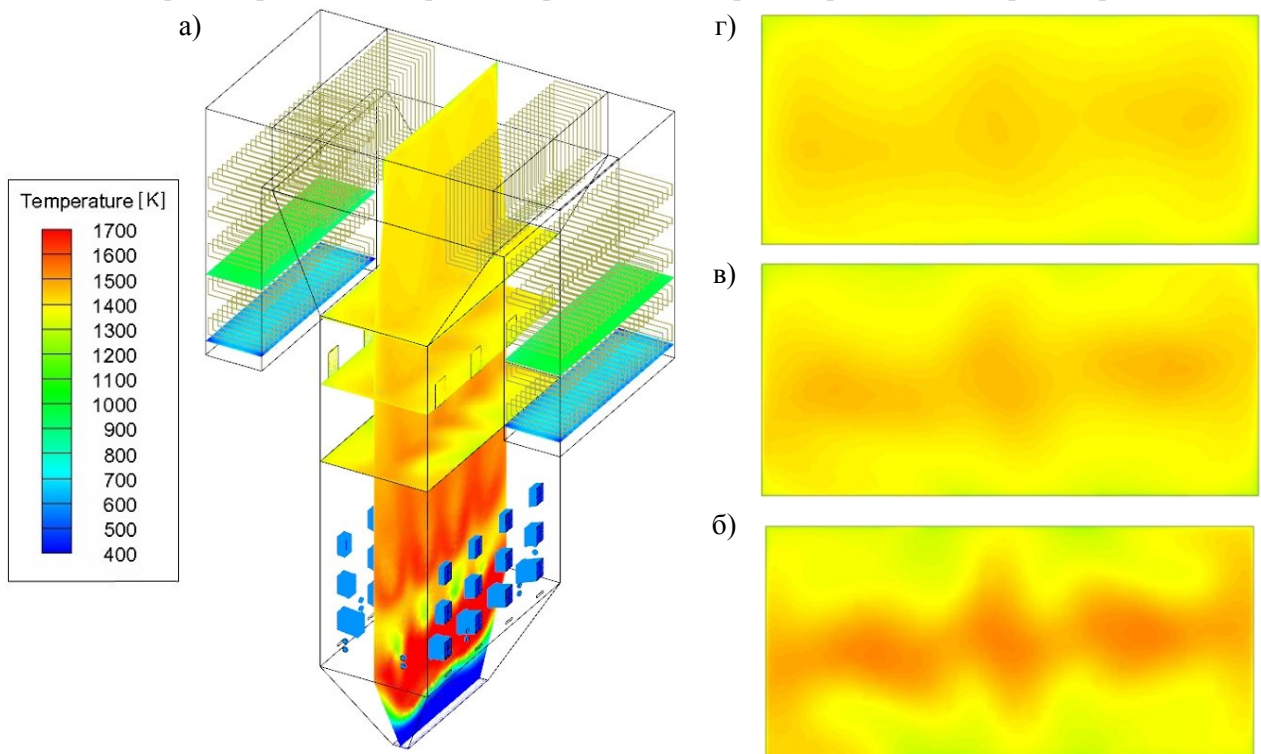
На слици 10 извршен је паралелни приказ температурског поља у уздужним пресецима котла по ширини и дубини ложишта који је допуњен просторним приказом високих температура у ложишту. Максималне температуре у ложишту парног котла за ове радне услове се крећу у распону од 1250 °C до 1400 °C. Анализом поменутог приказа може се уочити да се максималне температуре јављају у зонама испод првог нивоа горионика а као резултат повећаног протока аеросмеше кроз доње горионике. Како су горионици нагнути 15 ° према ложишном левку, 51 % аеросмеше и секундарног ваздуха са првог нивоа прелазе путању кроз део ложишног левка па се интензивно сагоревање одвија у зонама испод горионика у пољу значајно увећане концентрације кисеоника што за последицу има и раст локалне температуре продуката сагоревања. Анализом поља на слици 10 може се приметити да је аеросмеша са доњег нивоа горионика значајније усмерена ка ложишном левку, а у недостатку отпора у виду продуката сагоревања који се крећу ка излазу из котла. Насупрот њој, угљени прах аеросмеше са другог нивоа горионика има, под нешто мањим нагибом, довољан домет и путању ка средишту ложишта, а након чега наставља путању нагоре, те сходно томе укупно краћи пут и време задржавања у ложишту. Код угљеног праха са трећег нивоа горионика је ова појава још више изражена па честице раније скрећу ка излазу из ложишта. Суштински, формирану продукте сагоревања угљеног праха са првог нивоа горионика својим импулсом делимично исправљају улазне струје које се формирају са другог а нарочито трећег нивоа горионика и не дозвољавају да угљени прах продужи путању кроз доње делове ложишта. Оваква појава, условљена наспрамним положајем горионика, резултира тиме да један део угљеног праха, нарочито онај са горњег нивоа горионика, делимично сагорева у зонама изнад горионика где се и одржавају температуре до 1250 °C. Како је количина угљеног праха која се уводи у трећи ниво горионика свега 19 % и како се



Слика 2. Температурско поље у прорачунском домену

при сагоревању угља са већом склоношћу ка прљању грејних површина ($H_d = 10341 \text{ kJ/kg}$) за снагу блока од 260 MW, са искљученим ЗВП и осам млинова у раду

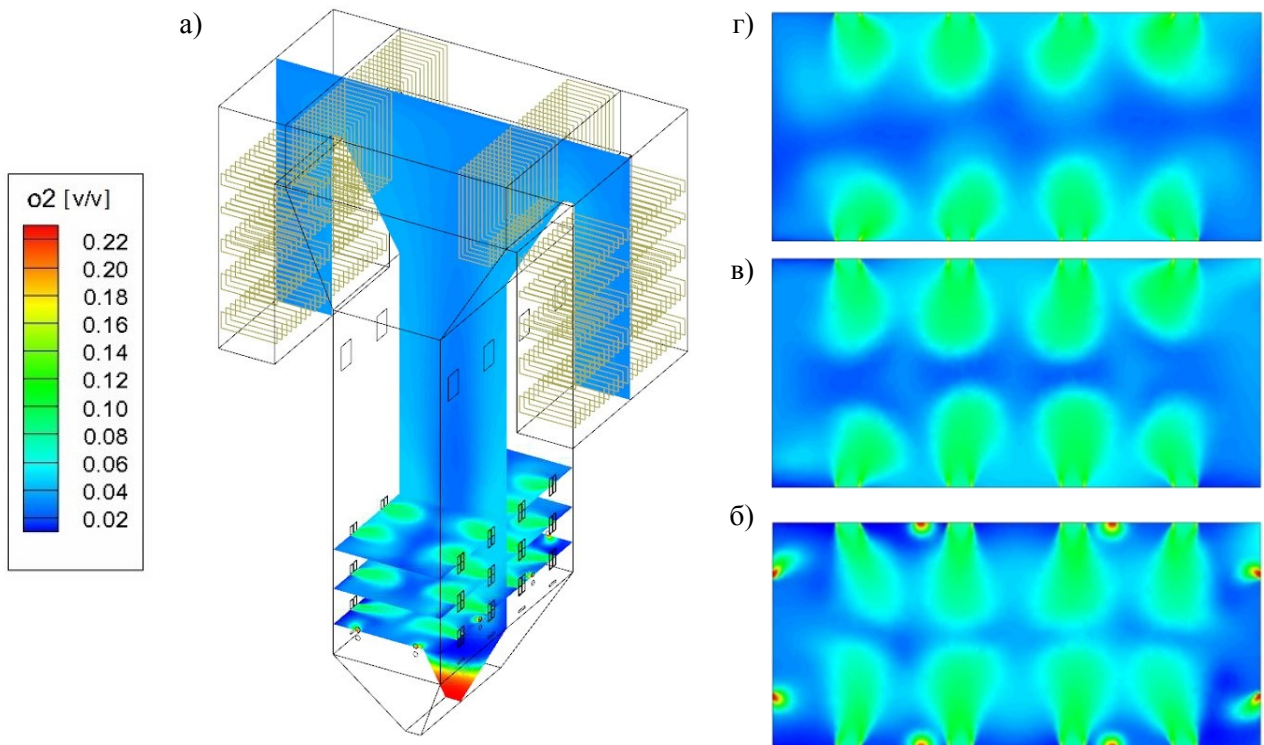
- а) Средишњи уздужни пресек по ширини котла; б) Попречни пресек по оси доњег горионика; в) Попречни пресек по оси средњег горионика; г) Попречни пресек по оси горњег горионика.



Слика 3. Температурско поље у прорачунском домену

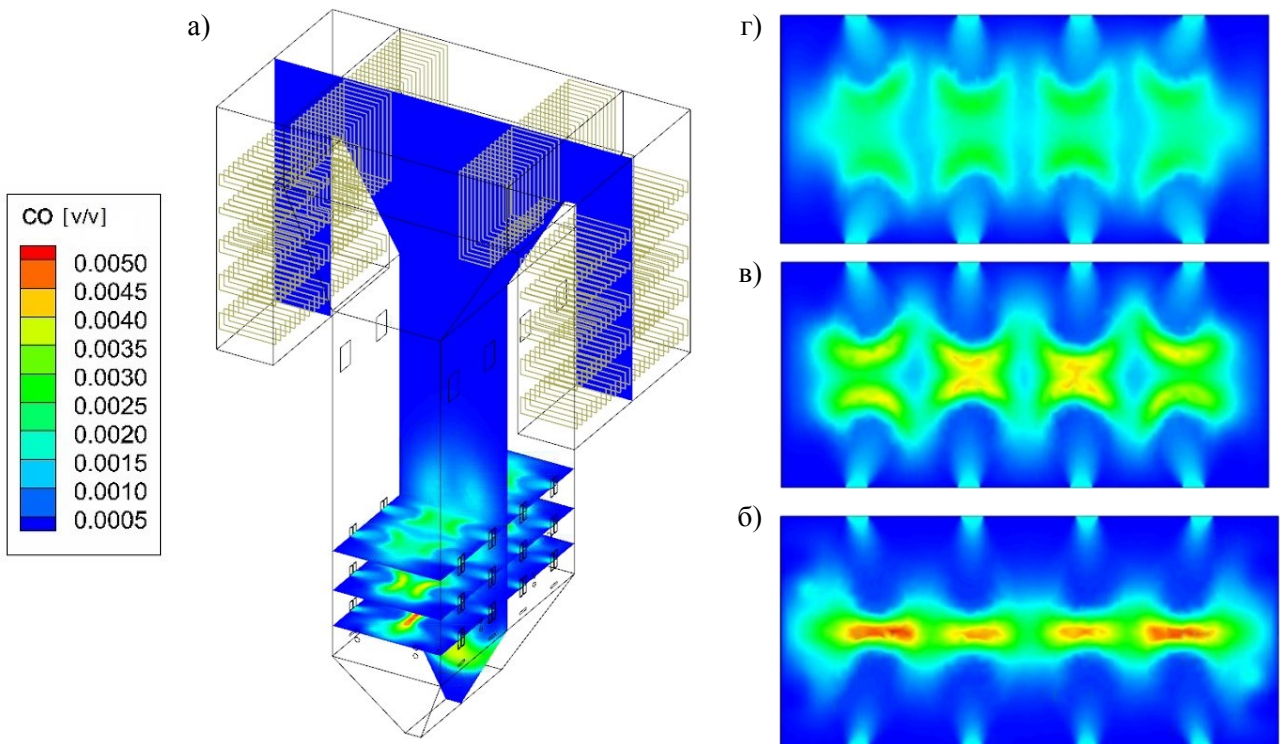
при сагоревању угља са већом склоношћу ка прљању грејних површина ($H_d = 10341 \text{ kJ/kg}$) за снагу блока од 260 MW, са искљученим ЗВП и осам млинова у раду

- а) Средишњи уздужни пресек по дубини котла; б) Попречни пресек на коти 30,4 m; в) Попречни пресек на коти 38,5 m; г) Попречни пресек на коти 45,0 m.



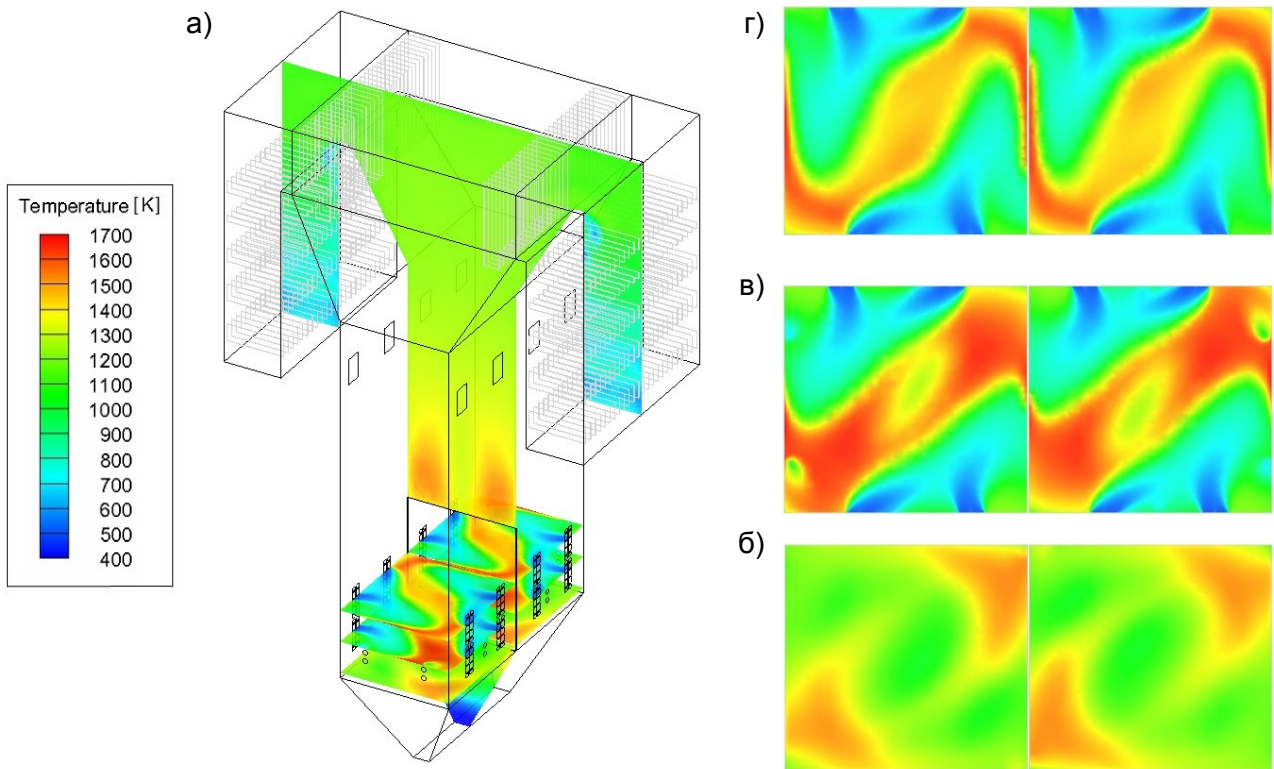
Слика 4. Поље кисеоника у прорачунском домену при сагоревању угља са већом склоношћу ка прљању грејних површина ($H_d = 10341$ kJ/kg) за снагу блока од 260 MW, са искљученим ЗВП и осам млинова у раду

- а) Средишњи уздужни пресек по ширини котла; б) Попречни пресек по оси доњег горионика; в) Попречни пресек по оси средњег горионика; г) Попречни пресек по оси горњег горионика.



Слика 5. Поље угљен-монооксида у прорачунском домену при сагоревању угља са већом склоношћу ка прљању грејних површина ($H_d = 10341$ kJ/kg) за снагу блока од 260 MW, са искљученим ЗВП и осам млинова у раду

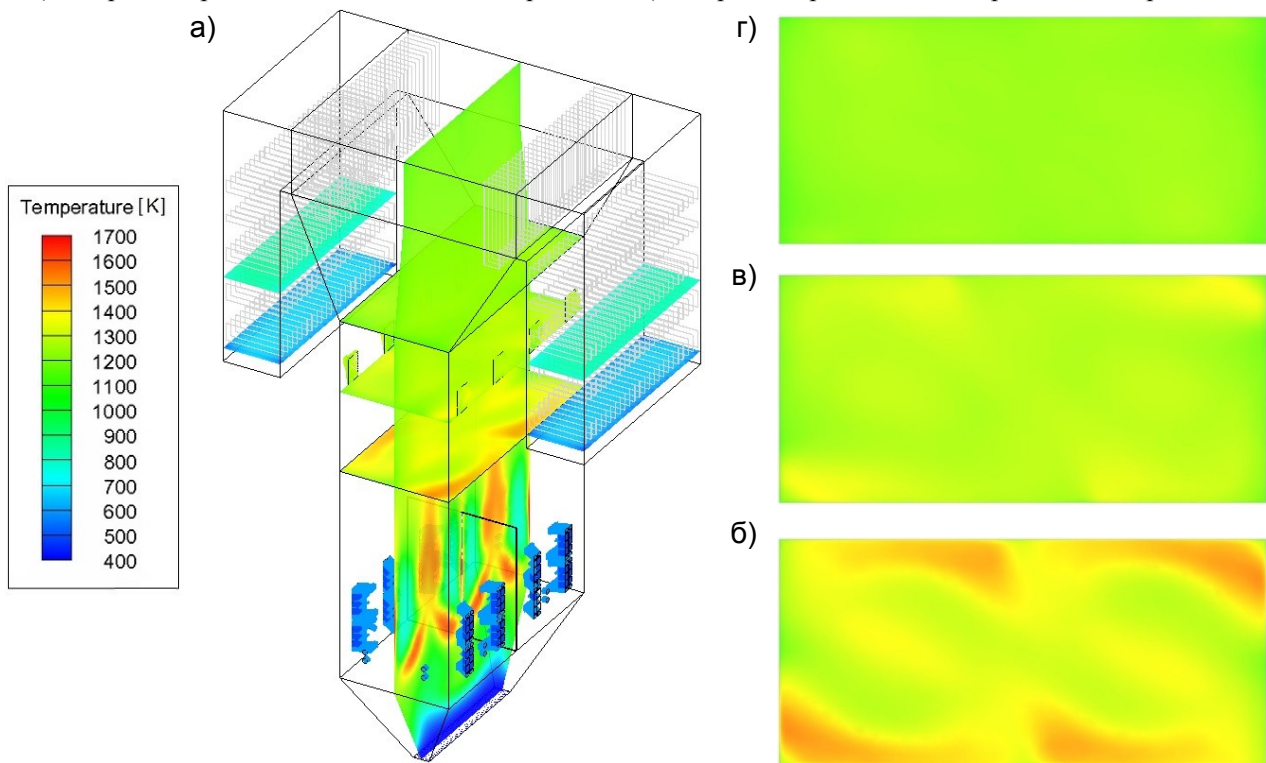
- а) Средишњи уздужни пресек по ширини котла; б) Попречни пресек по оси доњег горионика; в) Попречни пресек по оси средњег горионика; г) Попречни пресек по оси горњег горионика.



Слика 6. Температурско поље у прорачунском домену

при сагоревању угља са мањом склоношћу ка прљању грејних површина ($H_d = 10341 \text{ kJ/kg}$) за снагу блока од 300 MW, са укљученим ЗВП и осам млинова у раду

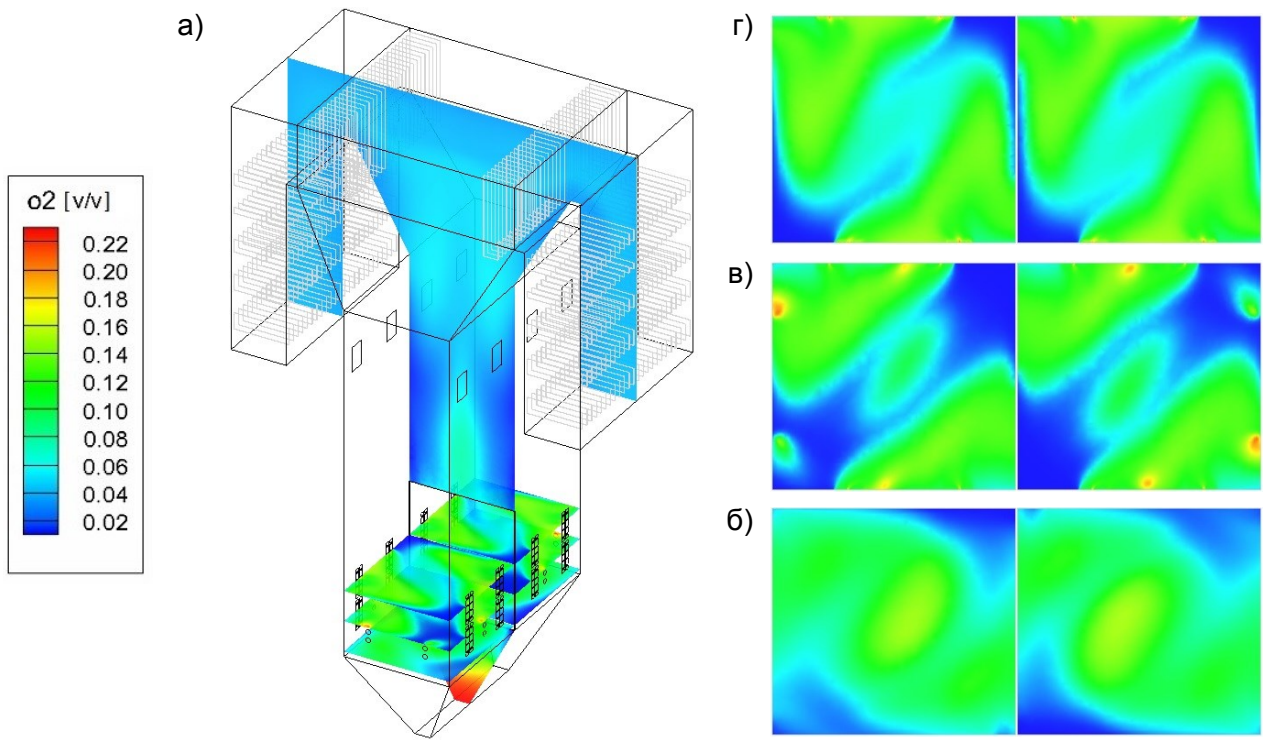
- а) Средишњи уздужни пресек по ширини котла; б) Попречни пресек изнад левка; в) Попречни пресек по оси доње етаже горионика; г) Попречни пресек по оси горње етаже горионика.



Слика 7. Температурско поље у прорачунском домену

при сагоревању угља са мањом склоношћу ка прљању грејних површина ($H_d = 10341 \text{ kJ/kg}$) за снагу блока од 300 MW, са укљученим ЗВП и осам млинова у раду

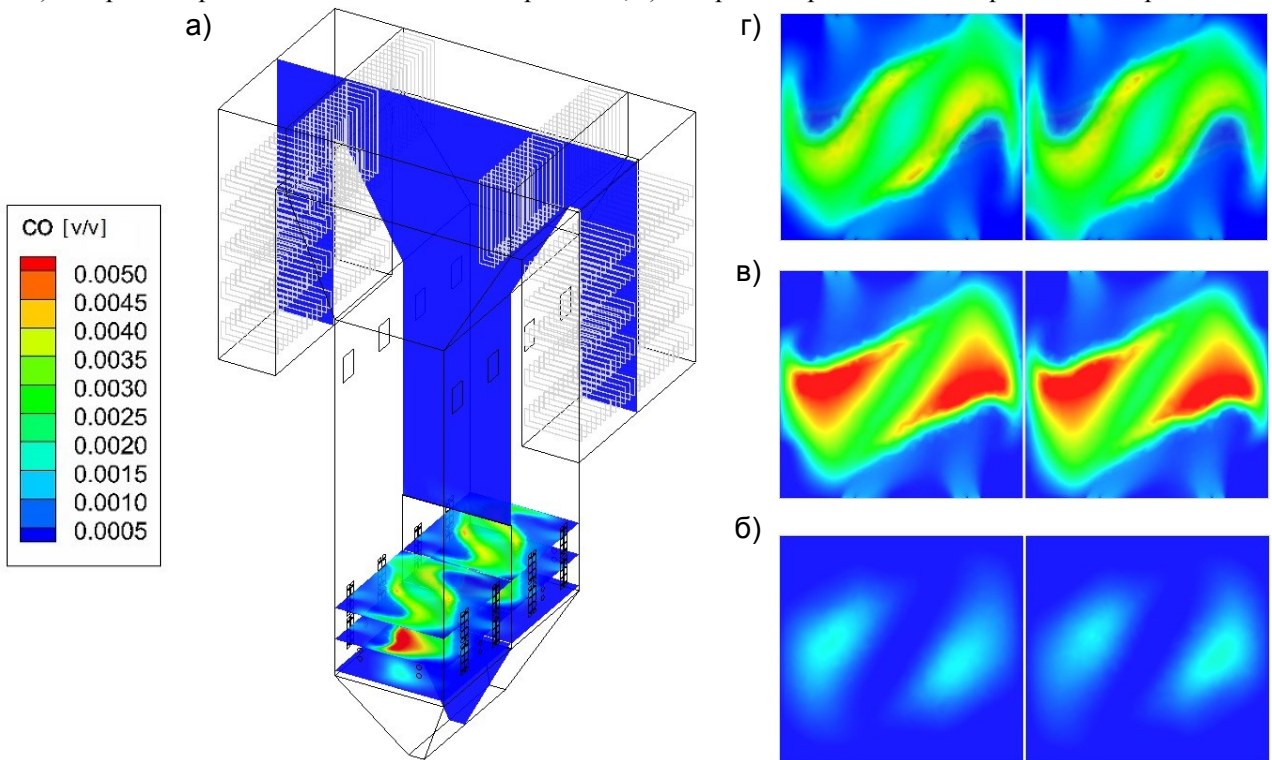
- а) Средишњи уздужни пресек по дубини котла; б) Попречни пресек на коти 30,4 m; в) Попречни пресек на коти 38,5 m; г) Попречни пресек на коти 45,0 m.



Слика 8. Поље кисеоника у прорачунском домену

при сагоревању угља са мањом склоношћу ка прљању грејних површина ($H_d = 10341 \text{ kJ/kg}$) за снагу блока од 300 MW, са укљученим ЗВП и осам млинова у раду

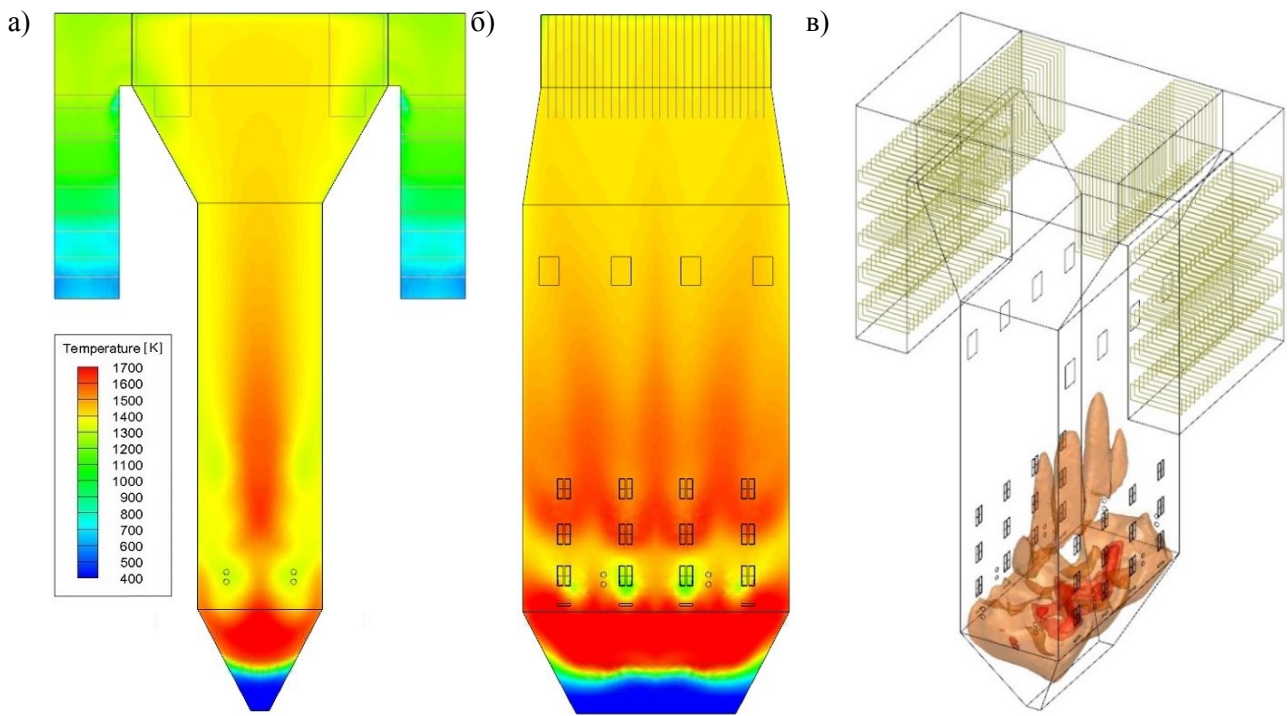
- а) Средишњи уздужни пресек по ширини котла; б) Попречни пресек изнад левка;
 в) Попречни пресек по оси доње етаже горионика; г) Попречни пресек по оси горње етаже горионика.



Слика 9. Поље угљен-монооксида у прорачунском домену

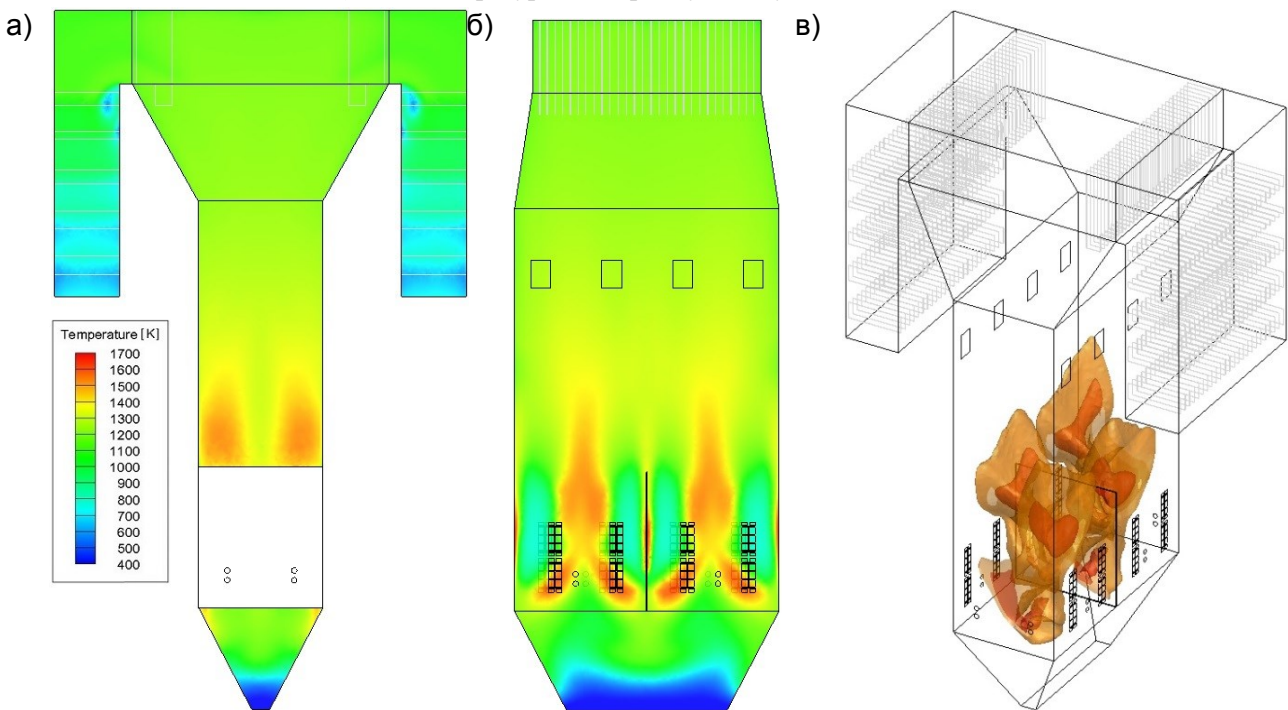
при сагоревању угља са мањом склоношћу ка прљању грејних површина ($H_d = 10341 \text{ kJ/kg}$) за снагу блока од 300 MW, са укљученим ЗВП и осам млинова у раду

- а) Средишњи уздужни пресек по ширини котла; б) Попречни пресек изнад левка;
 в) Попречни пресек по оси доње етаже горионика; г) Попречни пресек по оси горње етаже горионика.



Слика 10. Температурско поље и просторни приказ високих температура у прорачунском домену при сагоревању угља са већом склоношћу ка прљању грејних површина ($H_d = 10341 \text{ kJ/kg}$) за снагу блока од 260 MW, са искљученим ЗВП и осам млинова у раду

- а) Средишњи уздужни пресек по ширини котла; б) Средишњи уздужни пресек по дубини котла;
 в) Изотемпературске површи у опсегу 1523 – 1673 K.



Слика 11. Температурско поље и просторни приказ високих температура у прорачунском домену при сагоревању угља са већом склоношћу ка прљању грејних површина ($H_d = 10341 \text{ kJ/kg}$) за снагу блока од 300 MW, са укљученим ЗВП и осам млинова у раду

- а) Средишњи уздужни пресек по ширини котла; б) Средишњи уздужни пресек по дубини котла;
 в) Изотемпературске површи у опсегу 1553 – 1623 K.

сагоревање одвија у пољу високе концентрације кисеоника оно се у највећој мери завршава до коте 23,5 m. Анализом температурског поља у уздужној равни може се констатовати да је расподела аеросмеше по нивоима горионика, у односу од 51:30:19 по маси, допринела спуштању пламена и његове максималне температуре ка ложишном левку. Додатно се може констатовати да је други део пламена нешто продужен услед мањег импулса са трећег нивоа горионика па је оваквом расподелом постигнут пламен који је спуштен али унеколико продужен у правцу излаза из ложишта. Све наведено је резултирало средњом излазном температуром продуката сагоревања од 1043 °C.

На слици 4 приказано је поље кисеоника где се јасно види да је сагоревање организовано у условима значајно повећане концентрације, а сходно коефицијенту вишка ваздуха од 1,24. Анализом попречних пресека кроз горионике може се приметити да начин увођења и велике брзине секундарног ваздуха обезбеђују да честице угљеног праха на свом путу пролазе кроз поље високе концентрације кисеоника које обезбеђује брзе реакције, како је и конципирано конвенционално сагоревање. Убрзање сагоревања је додатно остварено припремом угљеног праха повећане финоће како је приказано у табели 4, где је приказан и однос брзина секундарног ваздуха и аеросмеше који за овај радни режим износи 2,70.

Прегледом поља угљен-моноксида на слици 5 могу се видети зоне по висини ложишта, изнад горњег нивоа горионика, где се сагоревање у највећој мери завршава. Већа концентрација угљен-моноксида појављује се у зонама активног сагоревања у нивоу горионика у средишњем делу ложишта.

Анализом радног режима, са пројектном организацијом, може се констатовати да је процес сагоревања спуштањем пламена отпочео раније и да се максимална температуре јавља у зони испод првог нивоа горионика. Пламен специфичног завесастог облика нешто је продужен а прорачуни су показали да је његова ирадијација ка зидовима мања од пламена који се формира око централног вртлога. Поред мање количине емитоване енергије повећано запрљање са стране зида представља додатни отпор апсорпцији па као крајњи резултат имамо високу температуру продуката сагоревања на крају ложишта. Повећан садржај кисеоника и рециркулисаних хладних продуката сагоревања, као мера обарања средње излазне температуре продуката сагоревања из ложишта, омогућили су да се сагоревање одвија убрзано и да садржај азотних оксида буде на нивоу од 396 mg/Nm³.

На сликама 6 и 7 приказана су температурска поља у средишњим уздужним и карактеристичним попречним пресецима котла, за најповољнији реорганизовани радни режим (ТС4^{**}) при сагоревању угља мање склоности ка прљању. На уздужним пресецима може се приметити да је термички градијент велики, односно, да температура са стране продуката сагоревања у вертикалном правцу значајно опада. Попречни пресеци сугеришу да се висока температура сагоревања јавља у средишњем простору око централног вртлога и да се на овај начин формира пламен елипсасто-кружног облика у основи, као што се види на слици 6. Убрзано сагоревање које је постигнуто новом организацијом сагоревања сугерише да не постоји потреба за нагињањем горионика према ложишном левку. Прорачуни су показали да пламен, који се формира услед нове тангенцијалне оријентације горионика, има већу површину и ирадијацију према ложишним екранима. Анализом температурског поља у осним попречним пресецима горионика могу се уочити, мање изражене, зоне повишене температуре продуката сагоревања које се креће у опсегу између 1280 °C и 1350 °C. Како је снага централног вртлога доминантна, нема појаве задржавања дела угљеног праха око локалних вртлога у угловима главне зоне сагоревања па је мања опасност око допунског термичког напрезања и интензивног локалног запрљања у овим зонама а што је било изражено у пројектним условима рада. На слици 6 се лако може уочити да су високе температуре, до 1170 °C, присутне уз екранске зидове у горњим деловима ложишта до коте 30,4 m. Највише температуре продуката сагоревања уз зидове се јављају у доњим деловима ложишта у главној зони сагоревања. Приказано поље сугерише да су температуре продуката сагоревања непосредно уз преградни зид високе. Зоне овако повишених температура, представљају најосетљивије делове екранских зидова у погледу зашљакивања али су уже и

нешто нижих вредности температура него при раду у пројектним условима рада котла. На слици 11 извршен је паралелни приказ температурског поља у уздужним пресецима котла по ширини и дубини ложишта који је допуњен просторним приказом високих температура у ложишту. Анализом поменутог приказа може се уочити да се максималне температуре јављају у зонама горионика као резултат продуженог времена задржавања које честица проводи на овом нивоу услед повећане путање коју прелази у простору око централног вртлога. Интензивно сагоревање се одвија на овом путу у зонама горионика у пољу значајно увећане концентрације кисеоника што за последицу има велики раст локалне температуре продуката сагоревања. Анализом поља на слици 11 може се приметити да је аеросмеша са оба нивоа горионика усмерена хоризонтално. Додатно се може констатовати да је преградни зид поделио ложиште, у главној зони, у две једнаке целине приближно квадратног пресека које омогућавају формирање два једнака централна пламена, која се због своје геометрије, интензивније хладе. Показало се да је постојање преградног зида у функцији одржавања жељене геометрије пламена и да је његов утицај занемарљив са аспекта укупно пренесене количине топлоте. Све наведено резултирало је повећаним топлотним флуksom кроз екранске зидове ложишта и нижом средњом излазном температуром продуката сагоревања од 922 °C.

На слици 8 приказано је поље кисеоника где се јасно види да је сагоревање организовано у условима значајно повећане концентрације кисеоника, а сходно коефицијенту вишка ваздуха у ложишту од 1,20. Анализом попречних пресека кроз горионике може се приметити да начин увођења и довољно велике брзине секундарног ваздуха обезбеђују да честице угљеног праха на свом путу пролазе кроз поље високе концентрације кисеоника које обезбеђује брзе реакције, како је и конципирано конвенционално сагоревање. Такође се може уочити да су зоне централног вртлога, у којима је потрошен кисеоник, оне у којима се одвија главни део процеса сагоревања. Убрзање сагоревања је додатно остварено и припремом угљеног праха повећане финоће како је приказано у табели 4.

Прегледом поља угљен-моноксида на слици 9 могу се видети зоне по висини ложишта, изнад преградног зида, где се сагоревање у највећој мери завршава. Већа концентрација угљен-моноксида појављује се у зонама активног сагоревања у нивоу горионика што је и очекивано.

Анализом радног режима, са реорганизованим системом, може се констатовати да је процес сагоревања применом нових горионика и начина увођења аеросмеше и ваздуха довео до убрзања процеса сагоревања и да се максимална температура јавља у зони у нивоу горионика. Пламен је специфичног облика тубуса који се формира око централног вртлога а прорачуни су показали да је његова ирадијација ка зидовима увећана у односу на пламену завесу која се формира у пројектним условима сагоревања. Увећана количине емитоване енергије уз пројектни ниво запрљања са стране екранских зидова као резултат има пројектно ниску температуру продуката сагоревања.

Продужено време боравка честице у ложишту уз повећан садржај кисеоника и рециркулисаних хладних продуката сагоревања, омогућили су да се сагоревање одвија у условима да садржај азотних оксида буде на нивоу од 451 mg/Nm³ при раду блока од 300 MW са укљученим загрејачима високог притиска. извршена за рад котла при пројектном стању (НР), то јест, при конвенционалном сагоревању без примарних мера за смањење садржаја азотних оксида у продуктима сагоревања.

Може се констатовати да је увођење нове организације сагоревања, на овакав начин, битно снизило температуру продуката сагоревања на крају ложишта, па парни котло може да постигне већу снагу до 300 MW.

Анализом рада постројења са енергетског аспекта може се нагласити да се услед промене коефицијента вишка ваздуха, повећане заптивености и примене турбинског економијера дошло до раста степена корисности котла и смањена је потрошња горива за иста оптерећења рада котла пре и након реорганизације што се види у табели 2. Додатно се

може констатовати да степен корисности опада са сижаванем оптерећења али да је он увек већи него при раду котла у тренутним нереорганизованим условима рада. Тако да са аспекта ефикасности рада постројења најповољнији режим представља ТС4** када котло ради са номиналном продукције, постиже снагу од 300 MW а угаљ је са мањом склоношћу ка прљању. Применом, на овакав начин постављеног процеса сагоревања угљеног праха, температуре продукта сагоревања на крају ложишта се значајно снижавају и ниже су него при мањој снази блока у НР режимима рада. Оваква појава резултира услед повећања топлотних флукса у ложишту у новим условима његовог рада. Температура продукта сагоревања на крају ложишта очекивано опада при мањем запрљању ложишних екрана.

Као резултат овакве промене у ложишту даљим преносом енергије температуре продукта сагоревања на излазу из полуозраченог прегрејача свеже прегрејане паре се осетно разликују од рада котла са тренутним системом сагоревања, а услед чега котло нема опасност од запрљања конвективних грејних површина на чијем улазу су температуре продукта сагоревања након предложених промена око 800 °C. Оваква појава је при постојећим радним условима утицала на ограничење рада чиме је постројење најчешће радило са смањеном снагом блока. Тако да и са аспекта сигурности рада нова организација сагоревања доводи до његовог раста.

У табели 4 приказани су изводи система прорачуна којима су представљени главни гранични услови и садржаји азотних оксида у излазним продуктима сагоревања. Може се констатовати да повећање снаге довело до раста садржаја азотних оксида што је очекивано како је задржана конвенционална концепција сагоревања а продужено време задржавања честица угљеног праха у ложишту.

Табела 4. Изводи система прорачуна котла

Ред. број	Назив	Ознака	Јединица мере	Снага блока [MW]					
				260		280	300		
				без ЗВП		са ЗВП			
				НР*	НР**	ТС1*	ТС2**	ТС3а*	ТС4**
1.	Коефицијент вишка ваздуха на излазу из ложишта	α_l	-	1,240	1,240	1,240	1,240	1,200	1,200
2.	Број млинова у погону	m	-	8	8	8	8	8	8
3.	Финоћа млевења угљеног праха	R_{1000}	%	2,20	2,20	2,20	2,20	2,20	2,20
		R_{90}	%	50	50	50	50	50	50
4.	Садржај азота у радном угљу	N^r	%	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81
5.	Однос брзине секундарног ваздуха и аеросмеше	w_{sv} / w_{ams}	-	2,70	2,27	2,68	2,28	2,54	2,69
6.	Степен рецикулације хладних продуката сагоревања са краја котла	r_2	-	0,145	0,145	0,130	0,130	0,125	0,120
7.	Средња температура продукта сагоревања на крају ложишта	t_l''	°C	1043	970	919	886	938	922
8.	Средња температура продукта сагоревања иза ЗПП	t_{POPi}	°C	869	817	821	791	841	828
9.	Температура димних гасова испред конвективног прегрејача свеже паре	t_2	°C	852	791	799	771	819	806
10.	Концентрација кисеоника у сувим димним гасовима	O_2	% v/v	4,08	4,07	4,08	4,08	3,82	3,59
11.	Рачунски садржај CO при референтним условима	CO	mg/Nm ³	44	46	25	30	33	37
12.	Рачунски садржај NOx при референтним условима	NO _x	mg/Nm ³	396	378	426	417	436	451

а Рад са смањеном снагом због одржавања температуре гасова на улазу у конвективне грејне површине;

* Рад котла са угљем са већом склоношћу ка зашљакивању;

** Рад котла са угљем са мањом склоношћу ка зашљакивању;

4. ЗАКЉУЧЦИ

Применом процедура повезивања интегралних и диференцијалних математичких модела испитина је нова организација процеса сагоревања у ТЕ Угљевик а тиме извршен избор геометрије и начина постављања нових горионика и преградног зида ложишта. На овај начин, за основу новог пламена, изабрана су два истосмерна централна вртлога као оптимална са аспекта симетрије температурског поља и одсуства посебно неповољних зона високе локалне температуре у области екранских зидова. Овакве границе ложишног простора, у главној зони сагоревања, омогућавају формирање два једнака централна пламена, која се због своје геометрије, интензивније хладе.

Извршени прорачуни показали су да предложена реорганизација процеса, у свим испитиваним погонским ситуацијама, обезбеђује ефикаснији рад постројења што је последица повећања топлотног флукса у ложишту, побољшаног заптивања и допунских грејних површина. Приказаном анализом показано је да се оваквом реорганизацијом система могу остварити пројектне снаге од 300 MW уз повећану сигурност рада постројења када температуре продуката сагоревања на улазу у конвективне грејне површине имају дозвољену вредност до 820 °C. У случају коришћења угљева повећане склоности ка прљању максимална снага коју је могуће сигурно остварити је 280 MW.

Прорачуни су допунски показали да се уз задржан висок садржај кисеоника и рециркулисаних хладних продуката сагоревања, повећану финоћу угљеног праха и продужено време боравка честице у ложишту, сагоревање одвија убрзано а да садржај азотних оксида расте, у зависности од радног оптерећења и запрљаности екранских зидова, од 426 до 451 mg/Nm³. У излазним продуктима сагоревања, као ни пре предложених мера, нема значајне количине заосталог угљен-моноксида.

РЕФЕРЕНЦЕ

- [1] Горан Ступар, Моделирање процеса у енергетском парном котлу са вишестепеним довођењем ваздуха по висини ложишта, Универзитет у Београду, Машински факултет, Београд, 2016. Године (докторска теза).
- [2] G. Stupar, et al., Assessing the impact of primary measures for NO_x reduction on the thermal power plant steam boiler; Applied Thermal Engineering, Vol. 78, p. 397-409, 2015, IF(2014)=2.624, ISSN 1359-4311
- [3] G. Stupar, et al., Air staging application effects on overall steam boiler operation, Thermal Science, 2019, vol. 23, Suppl. 5, pp. S1559-S1574, IF(2018)=1.541, ISSN 0354-9836
- [4] 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(2017)=3.771, ISSN 1359-4311
- [5] Љ. Бркић и др., ТЕРМИЧКИ ПРОРАЧУН ПАРНИХ КОТЛОВА, Универзитет у Београду - Машински факултет, Београд, 2015.
- [6] КОТЭС, Технички извештај о резултатима прегледа и топлотних испитивања котловск јединице типа П-64 енергоблока 300 MW ТЕ Угљевик, Новосибирск 2019.
- [7] ТЕ Угљевик (Опште карактеристике котла, елементарна анализа гарантног и коришћених угљева, реконструкција котловских грејних површина, подешавање котловске опреме и елемената)
- [8] Д. Туцаковић и др., ИЗРАДА МАТЕМАТИЧКИХ МОДЕЛА ГЛАВНИХ ПОСТРОЈЕЊА СА КОНТРОЛНИМ ПРОРАЧУНОМ, АНАЛИЗОМ РАДА И МЈЕРАМА ЗА ПОБОЉШАЊЕ СТАЊА ТЕ УГЉЕВИК – Котловско постројење, Универзитет у Београду - Машински факултет, Београд, 2020.
- [9] Д. Туцаковић и др., ИЗРАДА ТЕХНИЧКОГ РЈЕШЕЊА МОДЕРНИЗАЦИЈЕ ТЕ УГЉЕВИК, ФИНАНСИЈСКА ЕВАЛУАЦИЈА И КОНСУЛТАНТСКЕ УСЛУГЕ – Котловско постројење, Универзитет у Београду - Машински факултет, Београд, 2021.