

Ненад Ђ. Црномарковић^{1*}, Мирослав А. Сијерчић¹, Срђан В. Белошевић¹,
Драган Р. Туцаковић², Тийослав В. Живановић²

¹Лабораторија за термотехнику и енергетику,
Институт за нуклеарне науке „Винча”, Универзитет у Београду, Београд, Србија

²Машински факултет, Универзитет у Београду, Београд, Србија

Нумеричко одређивање радијационих својстава пламена угљеног праха

Оригинални научни рад

Испитан је утицај броја честица летећег пепела које настају фрагментацијом једне честице коксног осипа на радијациона својства дисперзне фазе пламена угљеног праха, као и да ли се применом тако добијених радијационих својстава дисперзне фазе може добити слањање резултата нумеричких испитивања са резултатима мерења. За услове сагоревања унутар ложичног блока А2 ТЕНТ снаге 210 MW, концентрација честица летећег пепела и функција расподеле су одређени под претпоставком да једна честица коксног осипа формира од једне до пет честица летећег пепела. Радијациона својства облака честица летећег пепела израчунавају се методом неправилне дифракције. Резултати показују да са порастом броја честица летећег пепела које настају од једне честице коксног осипа расту вредности коефицијената ајсорпције и расипања зрачења, али опада њихов однос. Вредности радијационих својстава употребљене су у диференцијалном математичком моделу процеса унутар изабраног ложичног блока. Коефицијент ајсорпције гасне фазе одређен је моделом једног сивога гаса и у свим испитиваним случајевима био је константан. Испитивање је показало да пораст коефицијената ајсорпције дисперзне фазе доводи до пораста температуре гасне фазе и флуkseва уједно зрачења, као и да се слањање са резултатима мерења постиже за све израчунане вредности радијационих својстава дисперзне фазе.

Кључне речи: математички модел, ложичне, угљени прах,
радијациона својства, дисперзна фаза

Увод

Пламен угљеног праха је двофазни медијум, који садржи гасну и дисперзну фазу. Гасну фазу чине гасовити продукти сагоревања, међу којима су за размену енергије зрачењем најважнији угљен-диоксид и водена пара. Дисперзну фазу чине честице угљеног праха и све честице које настају трансформацијом честица угљеног праха, као што су честице коксног остатка, чађи и летећег пепела. Утицај свих врста

* Одговорни аутор; електронска адреса: nemi@vinca.rs

честица осим летећег пепела је ограничен на мали део ложишта у близини горионика, тако да су радијациона својства пламена одређена честицама летећег пепела, [1].

Радијациона својства гасне и дисперзне фазе (облак честица летећег пепела) могу се одредити на разне начине. У нумеричким истраживањима процеса унутар ложишта, коефицијент апсорпције гасне фазе може се одредити моделом једног сивога гаса, тежинском сумом сивих гасова, емпиријским обрасцима или применом модела широких спектралних слојева [1–3]. Радијациона својства дисперзне фазе углавном се не наводе. Познато је да се она одређују на основу концентрације честица, оптичких својстава материјала честица и расподеле честица [1]. Концентрација и расподела честица летећег пепела последица су процеса настанка честица летећег пепела.

Честице летећег пепела настају трансформацијом минералних материја у угљу [4–6]. Минералне материје које су распрострањене по честици угља највећим делом остају у честици, топе се и спајају (коалесценција). Током сагоревања, једна честица коксног остатка распада се на неколико честица путем фрагментације и свака нова честица формира једну честицу летећег пепела уколико нема додатне фрагментације. Мањи део минералних материја, око 1,0%, испарава услед високих температура честица. Када гасна фаза постане презасићена, хомогеном нуклеацијом формира се велики број ситних честица, које повећавају свој пречник коагулацијом (судар две честице у близини честице коксног остатка) и кондензацијом испарелих минералних материја. Са опадањем температуре честица, сферне честице након судара формирају агломерисане честице.

Фрагментацијом честице коксног остатка настају најкрупније честице летећег пепела, које чине крупни мод честица. *Сарофим* са сарадницима [4] је утврдио да фрагментацијом од једне честице битуминозног угља настаје пет честица летећег пепела и да од једне честице лигнита настају три честице летећег пепела, независно од врсте угља и услова сагоревања у ложишту. Испаравањем минералних материја и накнадним процесима настају честице летећег пепела пречника 0,03–0,3 mm [6], које формирају ситни мод. Применом каскадних импактора утврђено је постојање честица пречника 1,0–4,0 mm, које чине трећи–централни мод. *Хелбле* са сарадницима [5] је утврдио да од једне честице лигнита пречника 80,0 mm настаје 200–500 честица летећег пепела централног мода.

Док је одређивање броја честица ситног и централног мода летећег пепела и њихових пречника у реалном ложишту непоуздано због недовољног познавања детаља процеса, број честица летећег пепела које настају фрагментацијом једне честице коксног остатка може се усвојити и на тај начин могу се одредити концентрација честица летећег пепела и расподела честица. Циљ овог истраживања је испитивање утицаја броја честица летећег пепела које настају фрагментацијом једне честице коксног остатка на радијациона својства дисперзне фазе пламена угљеног праха, као и испитивање да ли се применом таквих радијационих својстава може добити слагање резултата нумеричког истраживања са резултатима мерења.

Радијациона својства дисперзне фазе одређена су за услове да се од једне честице коксног остатка формирају две, три, четири или пет честица летећег пепела, као и за случај да целокупне минералне материје једне честице угља формирају једну честицу летећег пепела. Тако одређена радијациона својства употребљена су у диференцијалном математичком моделу процеса унутар ложишта блока А2 ТЕНТ снаге 210 MW. Геометрија ложишта, као и особине угља, потрошња угља и проток ваздуха већ су описани [7]. У наставку текста описан је метод одређивања радијационих својстава дисперзне фазе и наведене су вредности радијационих својстава дисперзне фазе.

Описан је и математички модел процеса у ложишту. На крају, описани су резултати са одговарајућим закључком.

Радијациона својства облака честица летећег пепела

Поступак одређивања радијационих својстава дисперзне фазе пламена угљеног праха састоји се од два дела: (1) одређивања концентрације честица летећег пепела на основу броја честица које настају фрагментацијом једне честице коксног остатка (честице ситног и централног мода летећег пепела су занемарене), и (2) одређивања радијационих својстава облака честица летећег пепела методом неправилне дифракције, коју су развили Менџуц и Висканија [8]. Концентрација честица летећег пепела одређена је на основу потрошње угљеног праха и састава продукта сагоревања. Концентрација честица за случај да се од једне честице коксног остатка формира једна честица летећег пепела је $N_0 = 0,218 \cdot 10^9 \text{m}^{-3}$. Када се од једне честице коксног остатка формира n честица летећег пепела, онда је концентрација честица n -ти умножак броја N_0 .

Осим познавања концентрације честица, за примену методе неправилне дифракције потребно је познавање параметара гама функције расподеле честица и спектралних вредности комплексног индекса рефракције.

Параметри гама функција расподеле одређени су на основу ситовне анализе и броја честица које настају фрагментацијом једне честице коксног остатка. Ситовна анализа је усвојена на основу карактеристика млина који се користи на блоку А2 ТЕНТ: $R_{90} = 55,0\%$, $R_{200} = 24,0\%$, $R_{1000} = 2,0\%$ [9]. Формиране су четири фракције угљеног праха, које су дате у табл. 1.

Средњи пречници фракција летећег пепела одређени су у зависности од броја честица које настају фрагментацијом једне честице угља, применом следећег обрасца:

Таблица 1. Фракције угљеног праха

Фракција	Средњи пречник [mm]	Масени удео	Број честица*
1	45,0	45,0	0,725
2	145,0	31,0	0,149
3	600,0	22,0	0,150
4	1500,0	2,0	0,870

* за један kg угљеног праха

$$d_{lp} = d_{up} \sqrt[3]{\frac{A}{N_{fr}} \frac{\rho_{up}}{\rho_{lp}}} \quad (1)$$

Усвојене густине честице угља и летећег пепела су $\rho_{up} = 1300,0 \text{ kg/m}^3$ и $\rho_{lp} = 2300,0 \text{ kg/m}^3$ [10].

Параметри гама функције расподеле (a , b и γ):

$$f(d) = ad^\gamma \exp(-bd) \quad (2)$$

одређени су на начин како је то описано у [1, 11] и дати су у табл. 2.

Таблица 2. Параметри гама функције расподеле честица

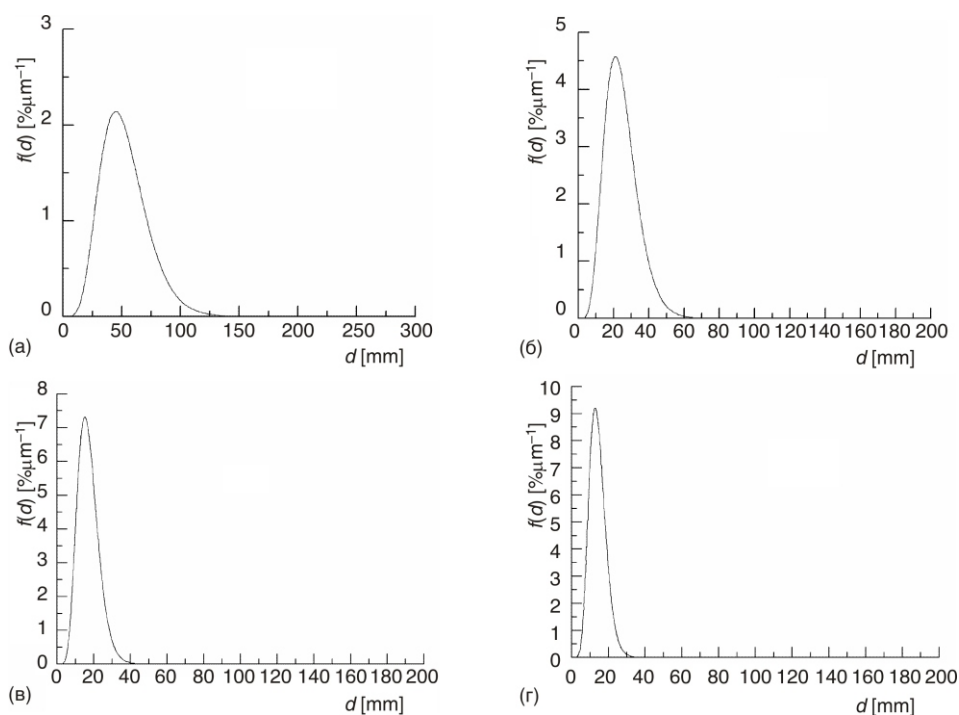
N_{fr}	a	b	γ
1	$0,2116 \cdot 10^{-6}$	0,2849	6
2	$0,2185 \cdot 10^{-7}$	0,4577	8
3	$0,7375 \cdot 10^{-7}$	0,5239	8
4	$0,1752 \cdot 10^{-6}$	0,5768	8
5	$0,7647 \cdot 10^{-6}$	0,6988	9

Дијаграми функције расподеле честица угљеног праха и летећег пепела приказани су на сл. 1 (а–г). Види се да са порастом броја честица летећег пепела које настају фрагментацијом једне честице угља дијаграм расподеле величине честица летећег пепела постаје ужи и да максимална вредност функције расподеле расте.

Метода неправилне дифракције може се применити када је реални део комплексног индекса рефракције (индекс рефракције) око 1,0 (мада може бити и око 2,0) и када је имагинарни део комплексног индекса рефракције (индекс апсорпције) врло мали (приближно

једнак нули). Како за лигнит Колубара не постоје објављене спектралне вредности индекса апсорпције, употребљене су средње вредности индекса апсорпције за чист пепео [9]. Радијациона својства облака честица летећег пепела лигнита Колубара за услове сагоревања у изабраном ложишту одређена су у зависности од броја честица које су настале фрагментацијом једне честице коксног остатка дата у табл. 3.

Резултати приказани у табл. 3 показују да вредности коефицијената апсорпције и расипања зрачења облака честица летећег пепела расту са порастом броја



Слика 1. Функција расподеле честица: (а) угљени прах, (б) летећи пепео, $N_{fr} = 1$; (в) летећи пепео, $N_{fr} = 3$; (г) летећи пепео, $N_{fr} = 5$

Таблица 3. Радијациона својства облака честица летећег пепела

Радијациона својства	N_{fr}				
	1	2	3	4	5
$K_{a,p}$, [m ⁻¹]	0,070	0,089	0,095	0,10	0,098
K_s , [m ⁻¹]	0,127	0,191	0,227	0,25	0,273
$K_{a,p}/K_s$ [-]	0,55	0,46	0,42	0,40	0,36

честица која настају фрагментацијом једне честице угља. (Изузетак постоји једино за коефицијенте апсорпције када је $N_{fr} = 4$ и $N_{fr} = 5$, али разлика је врло мала.) Однос коефицијента апсорпције и коефицијента расипања зрачења опада са порастом броја честица летећег пепела које настају фрагментацијом једне честице коксног остатка.

Добијене вредности коефицијената апсорпције и расипања зрачења дисперзне фазе блиске су доњим вредностима које су добијене мерењима на ложиштима енергетских котлова. Лоу са сарадницима [12] је извршио мерења радијационих својстава на четири енергетска ложишта за сагоревање угљеног праха. Резултати тих мерења показују да радијациона својства облака честица зависе од локације у ложишту на којој се мере, од оптерећења котла, као и од врсте угља. Вредности коефицијента апсорпције добијене су у интервалу 0,12–0,60/m, док су вредности коефицијента расипања зрачења добијене у интервалу 0,25–0,75/m¹. Вредности односа $K_{a,p}/K_s$ износе од 0,37 до 1,03, мада је за велику већину резултата доња граница око 0,60.

Разлике између радијационих својстава дисперзне фазе која су одређена описаним поступком и која су одређена мерењем могу бити последица сагоревања различитих угљева и услова сагоревања, али свакако и занемаривања угљеника у честицама летећег пепела у рачунској методи. Gupta и Wall [13] су показали да је индекс апсорпције летећег пепела који садржи несагорели угљеник већи од индекса апсорпције чистог пепела и да индекс апсорпције расте са порастом садржаја несагорелог угљеника. Разлике између рачунски и мерењем одређених радијационих својстава дисперзне фазе могу бити последица и тога што су у рачунском поступку занемарене ситне честице летећег пепела настале испаравањем минералних материја. Познато је да је коефицијент расипања зрачења облака ситних честице занемарљив у односу на коефицијент апсорпције [1].

Математички модел процеса у ложишту

Математички модел процеса у изабраном ложишту формиран је за процес двофазног струјања са хемијским реакцијама и разменом топлоте зрачењем [14].

Гасна фаза је описана временски осредњеним диференцијалним једначинама одржања масе, количине кретања, енталпије, концентрације компоненти гасне фазе, кинетичке енергије турбуленције и одумирања кинетичке енергије турбуленције у Euler-овом пољу. Систем једначина је затворен $k-\varepsilon$ моделом турбуленције. Диференцијална једначина за поље притиска добијена је комбинацијом једначине континуитета и једначине количине кретања. Поље притиска решено је применом алгоритма SIMPLE. Дисперзна фаза је описана диференцијалним једначинама кретања, промене масе и енергије Lagrange-овом пољу. Кретање честица се посматра дуж трајекторија са константним протоком честица. Утицај честица на гасну фазу узима се преко PSI-CELL концепта, по којем присуство честица изазива појаву додатних извора количине кретања, топлоте и масе у једначинама гасне фазе. Хетерогене реакције саго-

ревања угља разматране су у кинетичко-дифузионој области. Више детаља о моделу двофазног струјања и сагоревања честица угља може се пронаћи у [15, 16].

Размена енергије зрачењем одређена је зоналним моделом, којим се запремина ложишта дели на M запреминских зона, а зидови ложишта на N површинских зона [17]. Начин примене зоналног модела детаљно је описан у [18], а овде је описана само основна идеја. За сваку запреминску зону рачуна се нето размењена енергија зрачења, која се потом користи за рачунање изворног члана енталпијске једначине и нето размењене енергије зрачења једне честице.

Радијациона својства гасне фазе одређена су применом модела једног сивог гаса. На основу тоталне емисивности реалног гаса, која је одређена за парцијалне притиске CO_2 и водене паре за потпуно сагоревање угља са одређеним вишком ваздуха и температуру $T_g = 1500,0$ К, коефицијент апсорпције гасне фазе одређен је из релације $K_{a,g} = -\ln(1 - \varepsilon_g)/L$, где је L [m] средња дужина зрака у ложишту. Коефицијент апсорпције гасне фазе је $K_{a,g} = 0,07/\text{m}$.

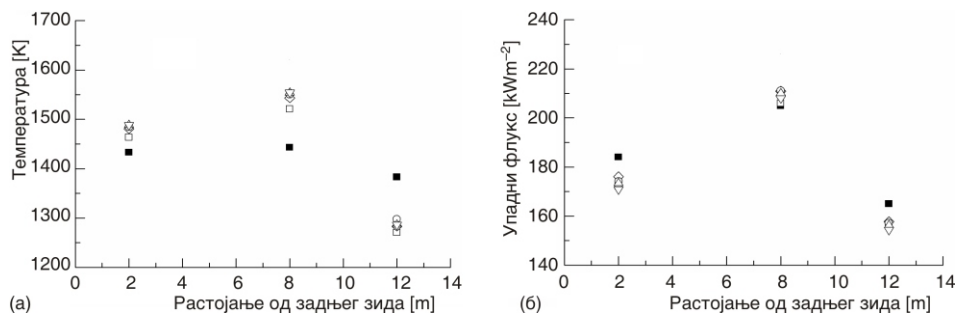
Резултати и дискусија

Нумеричка истраживања извршена су за услове пуног оптерећења котла. Распољиви резултати мерења су флуксиви упадног зрачења и температура пламена мерени на мерним отворима IP1–IP3 на левом ложишном зиду [19]. Резултати су приказани на сл. 2 (а, б).

Одступање резултата нумеричких истраживања и резултата мерења испитано је преко релативне разлике, која је дефинисана на следећи начин:

$$\delta_i = \frac{|\eta_{ns,i} - \eta_{m,i}|}{\eta_{m,i}} 100 \quad (3)$$

где η означава мерену физичку величину и индекс i означава број мерног отвора. Вредности релативних разлика приказане су у табл. 4 и 5. За сваки број честица летећег пепела који је настао фрагментацијом једне честице коксног остатка одређена је и средња релативна разлика, као аритметичка средина релативних разлика за сва три мерна отвора. Средње релативне разлике приказане су у табл. 6.



Слика 2. Поређење резултата математичког модела са резултатима мерења
(а) температура пламена, (б) упадни флукс $N_{fr} = 1 - \square$; $N_{fr} = 2 - \diamond$; $N_{fr} = 3 - \circ$;
 $N_{fr} = 4 - \triangle$; $N_{fr} = 5 - \nabla$; резултати мерења – ■

Резултатима који су приказани на сл. 2 (а, б) и табл. 4 и 5 показано је да се применом радијационих својстава дисперзне фазе која су одређена на описани начин могу добити резултати нумеричких истраживања који се слажу са резултатима мерења. Резултати приказани у табл. 6 показују да пораст коефицијента апсорпције дисперзне фазе доводи до пораста температуре пламена и флукса упадног зрачења. Разлог за ову зависност лежи у подели нето размењене енергије зрачења запреминских зона. На температуру гасне фазе највише утичу изворни чланови енталпијске једначине услед сагоревања и изворни члан услед размене енергије зрачењем. Изворни члан услед сагоревања постоји за контролне запремине у којима се одиграва сагоревање, а то су само контролне запремине у близини горионика. С друге стране, изворни члан енталпијске једначине услед размене енергије зрачењем постоји за све контролне запремине ложишта и углавном је негативан. Вредност изворног члана енталпијске једначине услед размене енергије зрачењем зависи од нето размењене енергије зрачења запреминских зона и односа коефицијената апсорпције гасне и дисперзне фазе. Коефицијент апсорпције гасне фазе је константан у свим испитиваним случајевима, док је коефицијент апсорпције дисперзне фазе променљив и расте са порастом броја честица летећег пепела које настају од једне честице коксног остатка. Порастом коефицијента апсорпције дисперзне фазе смањује се губитак енергије гасне фазе услед зрачења што доводи до пораста температуре гасне фазе и апсорбоване енергије зрачења зидовима ложишта.

Резултати показују да су важне не само вредности радијационих својстава дисперзне фазе, већ и однос коефицијената апсорпције гасне и дисперзне фазе. У овом

раду, коефицијент апсорпције гасне фазе одређен је моделом једног сивога гаса. Ако би коефицијент апсорпције гасне фазе одређен неким другим моделом имао значајно различиту вредност од вредности која је добијена у овом раду, онда је вероватно да би се слагање са резултатима мерења добило за друге вредности радијационих својстава дисперзне фазе. Важно је и напоменути да резултати везани за вредности радијационих својстава дисперзне фазе, важе само за испитивано ложиште. Ако за неко друго ложиште приказани поступак одређивања радијационих својстава дисперзне фазе не обезбеђује слагање са резултатима мерења, онда се радијациона својства морају

Таблица 4. Релативна разлика за температуру пламена, [%]

Растојање, [m]	$N_{\text{г}}$				
	1	2	3	4	5
2	2,12	3,33	3,57	3,87	3,85
8	5,41	6,95	7,44	7,70	7,70
12	8,13	7,22	6,16	6,98	6,98

Таблица 5. Релативна разлика за флукс упадног зрачења, [%]

Растојање, [m]	$N_{\text{г}}$				
	1	2	3	4	5
2	6,46	4,30	5,32	5,77	7,11
8	0,47	2,98	3,01	2,42	1,47
12	5,57	4,38	4,68	5,30	6,44

Таблица 6. Средња релативна разлика, [%]

Мерена величина	$N_{\text{г}}$				
	1	2	3	4	5
Флукс	5,22	5,83	5,72	6,18	6,18
Температура	4,17	3,86	4,34	4,50	5,01

одредити на други начин. Осим тога, ови резултати важе за услове температурске неравнотеже између гаса и честица. У случају температурске равнотеже гаса и честица, резултати за изабрано ложиште би били другачији.

Закључак

Поступци за одређивање радијационих својстава дисперзне фазе пламена угљеног праха, која се користе у диференцијалним математичким моделима процеса унутар ложишта за сагоревање угљеног праха нису детаљно описани. У овом раду, приказани су поступак за одређивање радијационих својстава дисперзне фазе пламена угљеног праха и утицај таквих вредности радијационих својстава на резултате нумеричких истраживања. Концентрација и расподела честица летећег пепела одређени су из услова да се од једне честице коксног остатка формира од једне до пет честица летећег пепела, путем фрагментације. Услови сагоревања усвојени су за ложиште блока А2 ТЕНТ, у којем се сагорева лигнит Колубара. На основу резултати истраживања, изведени су следећи закључци:

- Са порастом броја честица летећег пепела које настају фрагментацијом једне честице коксног остатка расту вредности коефицијената апсорпције и расипања зрачења, а опада њихов однос. Вредности радијационих својстава одређена приказаним поступком блиске су доњим вредностима радијационих својстава која су добијена мерењем на другим ложиштима.
- Ако је коефицијент апсорпције гасне фазе константан, онда пораст коефицијента апсорпције дисперзне фазе доводи до пораста температуре гасне фазе и пораста флуксева упадног зрачења на зидовима ложишта. На примеру нумеричког истраживања процеса унутар ложишта блока А2 ТЕНТ, слагање са резултатима мерења било је задовољавајуће за све вредности израчунатих радијационих својстава дисперзне фазе.

Захвалност

Истраживања описана у овом раду резултат су рада на пројекту „Повећање енергетске и еколошке ефикасности процеса у ложишту за угљени прах и оптимизација излазне грејне површине енергетског парног коџла применом софтверских алата”, ТР-33018, финансираног од стране Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије.

Ознаке

A – садржај пепела, [–]
 a, b – параметар функција расподеле, [–]
 d – пречник, [mm]
 f – функција расподеле, [% m⁻¹]
 L – средња дужина зрака, [μm]
 K_a – коефицијент апсорпције, [m⁻¹]
 K_s – коефицијент расипања зрачења, [m⁻¹]
 M – укупни број запреминских зона, [–]
 N – укупни број површинских зона, [–]
 N_{fr} – број честица настао фрагментацијом, [–]

N_0 – концентрација честица, [m⁻³]
 R – остатак на ситу одговарајуће величине отвора, [–]
 T – температура, [K]

Грчки симболи

γ – параметар функција расподеле, [–]
 δ – релативна грешка, [%]
 e – емисивност, [–]
 ρ – густина, [kgm⁻³]

Индекси

g	– гасна фаза	p	– дисперзна фаза
lp	– летећи пепео	sr	– средња вредност
m	– резултат мерења	ur	– угљени прах
ns	– резултат нумеричке симулације		

Литература

- [1] Blokh, A. G., *Heat Transfer in Steam Boiler Furnaces*, Hemisphere Publishing Corporation, New York, USA, 1988
- [2] Liu, F., Becker, H. A., Bindar, Y., A Comparative Study of Radiative Heat Transfer Modelling in Gas-Fired Furnaces Using the Simple Grey Gas and the Weighted-Sum-Of-Gray-Gases Models, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 41 (1998), 3357-3371
- [3] Ashok, T. M., Radiation from Combustion Products, *Fire Research*, 1 (1979), 339-361
- [4] Sarofim, A. F., Howard, J. B., Padia, A. S., The Physical Transformation of the Mineral Matter in Pulverized Coal under Simulated Combustion Conditions, *Combustion Science and Technology*, 16 (1977), 187-204
- [5] Helble, J., Neville, M., Sarofim, A. D., Aggregate Formation from Vaporized Ash during Pulverized Coal Combustion, *Proceedings*, Twenty-first Symposium (International) on Combustion, Munich, West Germany, August 3-8, 1986, 411-417
- [6] Xu, M., et al., Coal Combustion-Generated Aerosols: Formation and Properties, *Proceedings of the Combustion Institute*, 33 (2011), 1681-1697
- [7] Crnomarković, N., et al., Influence of Forward Scattering on Prediction of Temperature and Radiation Fields Inside the Pulverized Coal Furnace, *Energy*, 45 (2012), 160-168
- [8] Menguc, M. P., Viskanta, R., On the Radiative Properties of Polydispersions: A Simplified Approach, *Combustion Science and Technology*, 51 (1987), 51-74
- [9] Живановић, Т., Бркић, Љ., Туцаковић, Д., Прорачун постројења за припрему угљеног праха, ВЕДЕС, Машински факултет, Универзитет у Београду, Београд, 2005
- [10] Menguc, M. P., Viskanta, R., A Sensitivity Analysis for Radiative Heat Transfer in a Pulverized Coal-Fired Furnace, *Combustion Science and Technology*, 51 (1987), 51-74
- [11] Modest, F. M., *Radiative Heat Transfer*, Academic Press, New York, USA, 2003
- [12] Lou, C., et al., Measurements of the Flame Emissivity and Radiative Properties of Particulate Medium in Pulverized-Coal-Fired Boiler Furnaces by Image Processing of Visible Radiation, *Proceedings of the Combustion Institute*, 31 (2007), 2771-2778
- [13] Gupta, R. P., Wall, T. F., The Optical Properties of Fly Ash in Coal Fired Furnaces, *Combustion and Flame*, 61 (1985), 145-151
- [14] Сијерчић, М., Математичко моделирање комплексних турбулентних транспортних процеса, Југословенско друштво термичара, Институт за нуклеарне науке „Винча“, Београд, 1998
- [15] Belošević, S., et al., A Numerical Study of a Utility Boiler Tangentially-Fired Furnace under Different Operating Conditions, *Fuel*, 87 (2008), 3331-3338
- [16] Belošević, S., et al., Numerical Prediction of Pulverized Coal Flame in Utility Boiler Furnaces, *Energy & Fuels*, 23 (2009), 5401-5412
- [17] Hottel, H. C., Sarofim, A. F., *Radiative Transfer*, McGraw-Hill, New York, USA, 1967
- [18] Crnomarković, N., et al., Numerical Investigation of Processes in the Lignite-Fired Furnace when Simple Gray Gas and Weighted Sum of Gray Gases Models Are Used, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 56 (2013), 197–205
- [19] Павловић, П., Ризнић, Ј., Резултати топлотних мерења у ложишту котла бр. 2 ТЕ „Никола Тесла“, Извештај ИБК-ЛТФТ-104, Институт за нуклеарне науке „Борис Кидрич“, Београд, 1976

Abstract**Numerical Determination of the Pulverized Coal
Flame Radiative Properties**

by

Nenad Dj. CRNOMARKOVIĆ^{1}, Miroslav A. SIJERČIĆ¹, Srdjan V. BELOŠEVIĆ¹,
Dragan R. TUCAKOVIĆ², and Titoslav V. ŽIVANOVIĆ²*

¹ **Laboratory for Thermal Engineering and Energy,**

Vinča Institute of Nuclear Sciences, University of Belgrade, Belgrade, Serbia

² **Faculty of Mechanical Engineering, University of Belgrade, Belgrade, Serbia**

Influence of the number of particles that are formed by fragmentation of one char particle on radiative properties of the dispersed phase of the pulverized coal flame, as well as on the results of numerical investigation of the process have been investigated. For the combustion conditions inside the furnace of A2 TENT 210 MW thermal unit, concentration of the flyash particles and particle size distribution parameters have been determined under assumption that one char particle forms from one to five flyash particles. Radiative properties of the cloud of flyash particles have been determined using anomalous diffraction method. Results show that increase of the number of flyash particles leads to the increase of the absorption and scattering coefficients. The differential mathematical model has been formed, for the process inside the chosen furnace. The absorption coefficient of the gas phase has been obtained by application of the simple gray gas model, and its value has been kept constant in all examined cases. Results show that increase of the dispersed phase absorption coefficient leads to the increase of the gas-phase temperature and incident radiative fluxes. Agreement with the results of measurement has been achieved for all values of the dispersed phase radiative properties.

Key words: *mathematical model, furnace, pulverized coal, radiative properties, dispersed phase*

* Corresponding author: e-mail: ncrni@vinca.rs

Рад примљен: 19. априла 2013.
Рад ревидиран: 18. јула 2013.
Рад прихваћен: 20. јула 2013.