

Александар Салџиков<sup>1</sup>, Биљана Вучићевић<sup>2</sup>, Жарко Сивановић<sup>2</sup>  
Ђорђе Козић<sup>1</sup>, Косија Маџлић<sup>2</sup>, Предраг Радовановић<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт за нуклеарне науке „Винча”, Београд

<sup>2</sup> Машински факултет, Универзитет у Београду, Београд

## Истраживање спектра емисивности наслага насталих при сагоревању чврстог фосилног горива у пећима широке употребе

Оригинални научни рад

UDC: 662.613.11:681.785.423

BIBLID: 0350-218X, 29 (2003), 1-4, 3-16

*У овом раду се описује истраживање карактеристика широкоспојног зрачења наслага пепела насталих при сагоревању чврстог фосилног горива у пећима широке употребе. Мерени су спектри нормалне емисивности у опсегу таласних дужина 2,5–25  $\mu\text{m}$  и укључене нормалне емисивности узорака четири врсте пепела дебљина реда милиметара и то на 600–1100 К при грејању и хлађењу. Закључено је да су слојеви праха наслага невидни за инфрацрвено зрачење. Спектрална емисивност расте са порастом таласне дужине зрачења и температуре пепела. Утицај хемијског састава пепела на спектралну емисивност није изражен. Укупна емисивност опада са порастом температуре. Слојеви наслага се синтеровају и спајају на температури изнад 1000 К, при чему је емисивност синтерованог слоја виша од емисивности слоја пре синтеровања. Код једне врсте слоја пепела, долази до семитранспаренције након синтеровања. Добијени резултати су сумирани са техничким савезима и предложен је просторак њиховог корелисања и коришћења у оквиру модела за симулацију сагоревања чврстог фосилног горива у пећима широке употребе.*

*Кључне речи: широкоспојно зрачење, спектрално мерење, емисивност, наслага пепела, сагоревање*

### Увод

При развоју, тестирању и имплементирању модела за симулацију сагоревања чврстог фосилног горива у пећима широке употребе, важно је познавати карактеристике топлотног зрачења пепела који се таложи у виду наслага на размењивачким површинама пећи и снижава ефикасност размене топлоте.

Први радови у овој проблематици датирају из средине шездесетих година прошлог века. У радовима [1–3] приказани су резултати мерења укупне емисивности и спектралне емисивности наслага пепела на таласној дужини од 0,9  $\mu\text{m}$ , и закључено је да емисивност показује изражену зависност од температуре и топлотне предисторије пепела. Аутори су запазили присуство семитранспаренције инфрацрвеног зрачења код синтерованих и стопљених наслага пепела, и сугерисали да је садржај кварцног песка од значаја за почетак стапања. Такође су разматрали утицај емисивности на пренос топлоте односно ефикасност котла на угљени прах. У раду [4] су приказана мерења укупне емисивности наслага пепела и њихових хемијских компоненти и потврђене су поменуте тенденције емисивности пепела. Закључено је да емисивност не зависи од азимута емисије. То значи да се слојеви пепела могу сматрати савршено-дифузним и да се бројна вредност полусферне емисивности може сматрати приближно једнаком бројној вредности нормалне емисивности. У радовима [5–8] приказани су резултати мерења инфрацрвеног спектра емисивности танких слојева пепела дебљине реда неколико десетина микрометара у циљу анализе фактора као што су оптичке константе и величина честица пепела који утичу на апсорпцију и расејање зрачења. Аутори су изложили дискусију о привидној емисивности неизотермног слоја наслага и њеном утицају на дефинисање преноса топлоте у котлу.

Имајући у виду претходна истраживања на пољу карактеристика топлотног зрачења пепела, наметнуле су се две битне теме које је требало разматрати. Прво, пепео је сложена мешавина разних једињења, нехомоген је по хемијском и физичком саставу који је подложен промени зависно од горива и услова сагоревања. У циљу искоришћења добијених вредности овако неизвесног материјала у инжењерској пракси, потребно је сагледати ствари са аспекта пројектовања, односно обављања термичког прорачуна одговарајућег уређаја, односно пећи, са сто већим степеном сигурности. То значи да експериментално истраживање треба спровести у циљу добијања што већег броја података на слојевима довољне дебљине, и затим одредити максималне и минималне могуће топлотне флуксе у систему. Друго, да би се узела у обзир изражена зависност радијационих карактеристика од температуре, неопходно је истражити спектре ових величина, јер је главни узрок изразите температурне зависности укупне емисивности пепела различит спектрални карактер емисивности, као и то што се укупна емисивност прилично разликује од укупне апсорптивности код већине не-сивих материјала посебно у системима са већим температурским разликама. Исто тако, треба испитати провидност слојева наслага за топлотно зрачење.

У овом раду, описано је истраживање карактеристика топлотног зрачења слојева пепела угља. Спектри нормалне емисивности у опсегу таласних дужина 2,5–25  $\mu\text{m}$  и укупне нормалне емисивности су мерени на четири типа узорака наслага пепела дебљине реда величине милиметара при 600–1100 К у процесима грејања и хлађења. Резултати су сумирани са термотехничког и термоенергетског аспекта и предложен је поступак за њихово коришћење у оквиру модела за симулацију сагоревања чврстог фосилног горива у пећима широке употребе.

## **Експерименти**

### *Припрема узорака*

Сирови материјал узорака су чинили комади наслага пепела одломљени са размењивачких површина у ложишту котлова двеју српских термоелектрана, у чијим

ложиштима сагорева нискокалоричан угаљ (лигнит) у спрашеном стању. Ови комади су узети са четири позиције на разним нивоима у котлу као што је приказано у табл. 1. Одломљени комади су се састојали од неорганичких једињења окамењених као стене са нехомогеностима реда величине милиметара. У циљу проучавања карактеристика топлотног зрачења слојева пепела, потребно је познавати просечне карактеристике ових смеша. Припремљени су спрашени узорци ситњем ових компактних комада и извршено је експериментално одређивање просечних карактеристика узорака спрашеног пепела.

У табл. 1. су дати основни подаци о узорцима;  $\rho$  је густина спрашеног пепела. У табл. 2. је дат хемијски састав. Узорак број 1 има висок садржај  $\text{CaSO}_4$  и  $\text{FeO}$ . Присуство оксида гвожђа је узрок веће густине овог и узорка број 2 који уз  $\text{FeO}$  и  $\text{CaSO}_4$  садржи и доста  $\text{CaO}$ . Узорак број 2 је тамносмеђ, и има високу апсорптивност у видљивом и блиском инфрацрвеном спектру. Узорак број 3 има знатно више  $\text{CaSO}_4$  и ружичаст је. За разлику од њих, узорак број 4 има висок садржај  $\text{SiO}_2$  као и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и боје је цигле. Честице су му у просеку нешто мање него код осталих узорака.

**Таблица 1. Карактеристике узорака наслага пепела**

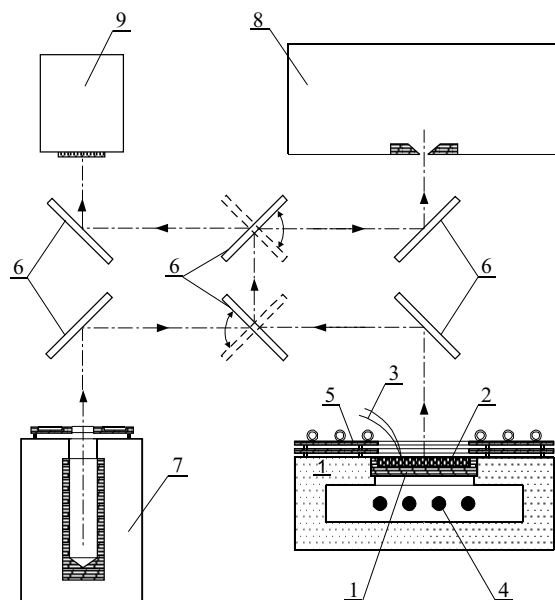
Број узорка	Ниво у ложишту	Структура	Боја		$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
			Комад	Прах	
1	10 m коси зид	п-грануле	смеђ	ружичаст	1378
		у-слојевит	цигласт		
2	30 m задњи зид	п-грануле	смеђ	смеђ	1469
		у-слојевит	црн		
3	46 m прегрејач	п-слојевит	љубичаст	ружичаст	898
		у-слојевит	цигласт		
4	10 m коси зид	п-грануле	љубичаст	цигласт	999
		у-грануле	цигласт		

(п – површина узорка, у – унутрашњост узорка)

**Таблица 2. Хемијски састав узорака % масе**

	Број 1	Број 2	Број 3	Број 4
$\text{CaSO}_4$	48,2	25,9	73,4	0,53
$\text{CaO}$	4,71	18,9	4,51	10,9
$\text{Al}_2\text{O}_3$	3,08	3,39	2,55	24,2
$\text{FeO}$	29,4	35,3	5,66	10,4
$\text{SiO}_2$	7,42	9,48	7,36	44,3

На сл. 1. дата је шема експерименталне апаратуре. Прах узорака наслага пепела је стављан у посудице (1) од нерђајућег челика дубине 1, 3 или 5 mm и тиме су формирани слојеви узорака (2). Површине посудица су оксидисане претходним загревањем до максималних температура у експерименту ради спречавања промене стања површине у току мерења. По један термопар типа К је завариван за доњу површину сваке посудице. Температура површине слоја узорка је мерена помоћу К-термопара (3) пречника 100  $\mu\text{m}$ . Топли спој термопара је утискиван на дубину од 0–0,5 mm. Узорци су загревани одоздо помоћу четири SiC грејача (4). Водом хлађени штит (5) је постављен да би се спречило да зрачење емитовано од стране врелог окружења површине узорка буде вишеструко рефлектовано и на тај начин делимично доспева у систем за оптичко мерење.



Слика 1. Шема експерименталне апаратуре

1 – посудица, 2 – узорак, 3 – термопар, 4 – грејач,  
5 – заштитни од зрачења, 6 – огледала, 7 – црно тело,  
8 – сиекиро-фоиометар, 9 – флуksметар

Сваки узорак је загреван до 600 K брзином промене температуре 2 K/мин., и вршено је оптичко мерење. Загревање је настављено истим темпом и на сваких 100 K све до 1100 K вршено је слично оптичко мерење. Након тога је сваки узорак хлађен истим темпом тј. 2 K/мин. и на сваких 100 K све до 600 K вршено је слично оптичко мерење.

Емисивност узорака различите дебљине и хемијског састава је одређивана на тај начин што је зрачење емитовано са површине узорка поређено са зрачењем референтног црног тела (7). За инфрацрвено спектрално мерење коришћен је спектрофотометар (8) типа Фуријеве (Fourier) трансформације (Shimadzu Co., модел FTIR-4200), који мери спектар од 1868 дискретних вредности у опсегу таласних дужина  $\lambda = 2,5\text{--}25 \mu\text{m}$ , где је присутно више од 95 одн. 75% енергије зрачења црног тела на

тем- пературама од 600 K и 1100 K, респективно. Спектрална резолуција спектрофотометра је  $2 \text{ cm}^{-1}$  на  $\lambda = 12,3 \mu\text{m}$ , што је оцењено као исувише прецизно за потребе овог истраживања. Укупни радијациони флуksметар (9) за мерење укупне емисивности, добијен је модификацијом пирометра (Minolta Co., модел 505S), који мери флуks топлотног зрачења, рефлектованог помоћу два алуминијумска огледала и пропуштеног кроз КРС-5 филтер, уз помоћ термоелектричног детектора. Сматра се

да су спектралне апсорпционе карактеристике огледала и филтера довољно сиве у опсегу  $\lambda = 1-40 \mu\text{m}$ .

Шупљина референтног црног тела је цилиндричног облика. Његова привидна нормална емисивност  $\varepsilon_{N,pr}$  једнака је 0,99 у целој инфрацрвеној области. Температура унутрашње површи црног тела је мерена коришћењем радијационог пирометра калибрисаног помоћу стандардних црних тела. Температура референтног црног тела је мерена праћењем показивања термопара инсталисаног у њему.

Интензитет  $v_{ct}(\lambda_i, T_{ct,j})$  зрачења црног тела температуре  $T_{ct,j}$  који мери спектрофотометар на свакој дискретној вредности  $\lambda_i$  се добија као:

$$v_{ct}(\lambda_i, T_{ct,j}) = \frac{\varepsilon_{N,pr} A(\lambda_i)}{\frac{C_2}{e^{\lambda_i T_{ct,j}} - 1}} \frac{B(\lambda_i)}{\frac{C_2}{e^{\lambda_i T_{ct,0,j}} - 1}} \quad (1)$$

где други члан на десној страни једн. (1) компензује утицај зрачења околине на собној температури.  $C_2$  је Планкова (Planck) друга константа зрачења.  $A(\lambda_i)$  и  $B(\lambda_i)$  су константе мерног система које зависе од таласне дужине, а  $T_{ct,0,j}$  је собна температура у тренутку оптичког мерења при температури црног тела  $T_{ct,j}$ . Интензитет  $v_{ct}(\lambda_i, T_{ct,j})$  за сваку дискретну вредност  $\lambda_i$  је мерен унапред на већем броју температура  $T_{ct,j}$  ради одређивања константи  $A(\lambda_i)$  и  $B(\lambda_i)$ . Емисивност узорка на температури  $T_U$ , рачуна се коришћењем следеће једначине:

$$\varepsilon_N(\lambda_i, T_U) = \frac{v_U(\lambda_i, T_U) \frac{B(\lambda_i)}{\frac{C_2}{e^{\lambda_i T_{U,0}} - 1}}}{\frac{\varepsilon_{N,pr} A(\lambda_i)}{\frac{C_2}{e^{\lambda_i T_U} - 1}}} \quad (2)$$

где је  $v_U(\lambda_i, T_U)$  измерен интензитет зрачења слоја узорка, а  $T_{U,0}$  температура околине у тренутку оптичког мерења. Оптичко мерење је на свакој температури трајало неколико минута. Температуре црног тела, узорка и амбијента у том периоду се нису значајније мењале.

Укупни (светаласни) интензитет зрачења  $v_{ct}^{\text{tot}}(T_{ct,j})$  који мери укупни флуксметар се израчунава као:

$$v_{ct}^{\text{tot}}(T_{ct,j}) = \varepsilon_{N,pr}^{\text{tot}} A^{\text{tot}} T_{ct,j}^4 + B^{\text{tot}} T_{ct,0,j}^4 \quad (3)$$

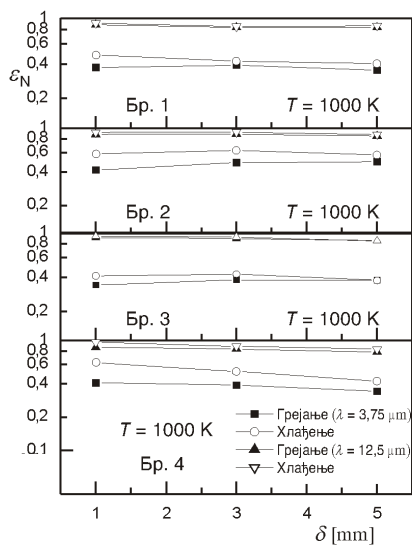
где су  $A^{\text{tot}}$  и  $B^{\text{tot}}$  константе мерног система за одређивање укупне емисивности. Интензитет  $v_U^{\text{tot}}(T_U)$  је измерен унапред на већем броју температура  $T_{ct,j}$  ради одређивања константи  $A^{\text{tot}}$  и  $B^{\text{tot}}$ . Укупна емисивност узорка на температури  $T_U$  израчунава се помоћу следеће једначине:

$$\varepsilon_N^{\text{tot}}(T_U) = \frac{v_U^{\text{tot}}(T_U) + B^{\text{tot}} T_{U,0}^4}{\varepsilon_{N,pr}^{\text{tot}} A^{\text{tot}} T_U^4} \quad (4)$$

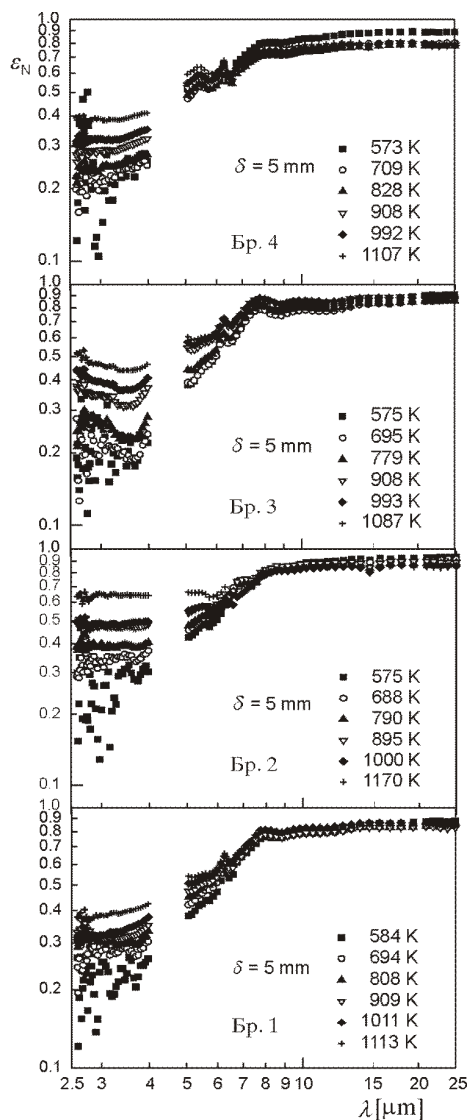
где је  $v_U^{\text{tot}}(T_U)$  измерен светаласни интензитет зрачења слоја узорка, а  $T_{U,0}$  је температура околине у тренутку оптичког мерења.

### Анализа резултата

У експериментално одређеним спектрима, изражена је апсорпција троатомних гасова. Запажамо апсорпцију  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  на  $\lambda = 2,6-2,7 \mu\text{m}$ , траке око  $4,3$  и  $15 \mu\text{m}$  услед апсорпције  $\text{CO}_2$  као и око  $6,3 \mu\text{m}$  услед  $\text{H}_2\text{O}$ . Мерне вредности у тим опсезима садрже систематске грешке. Поузданост мерења је посебно ниска у области око  $4,3 \mu\text{m}$  апсорпције  $\text{CO}_2$ . Мала промена у концентрацији  $\text{CO}_2$  у околини узорка услед загревања, значајно утиче на мерења у опсегу  $\lambda = 4,0-5,0 \mu\text{m}$ . Вредности измерене у овој области изузете су из разматрања која следе.



Слика 2. Зависност спектралне ( $\lambda = 3,75$  и  $12,5 \mu\text{m}$ ) емисивности од дебљине слоја узорка (узорци број 1– 4 са  $\delta = 1-5 \text{ mm}$  при  $T = 1000 \text{ K}$  у процесима загревања и хлађења)



Слика 3. Спектри емисивности наслага пепела (узорци број 1–4 са  $\delta = 5 \text{ mm}$  при  $T = 600-1100 \text{ K}$  у процесу загревања)

### *Нейровидносћ слојева наслага*

Мерни систем је конципиран тако да се температура мења по дубини узорка. Пошто зависност емисивности од температуре није посебно изражена, емисивност се не мења битније по дубини узорка. Али, ако је слој узорка семи-транспарентан за инфрацрвено зрачење, емисија која потиче из слоја испод површине или из посуде у којој се налази узорак се такође мери, и измерена емисивност  $\varepsilon_N$ , нормализована температуром површине, јесте привидна емисивност. Ова вредност је виша од праве емисивности. Привидна емисивност зависи од дебљине слоја узорка.

На слици 2. је приказана зависност измерених спектралних емисивности на  $\lambda = 3,75$  и  $12,5 \mu\text{m}$  наслага пепела од њихове дебљине – и то за узорке број 1–4 дебљине  $\delta = 1$ – $5 \text{ mm}$  на  $1000 \text{ K}$  у процесима загревања и хлађења. При загревању, емисивност  $\varepsilon_N$  не показује изразиту зависност од дебљине  $\delta$  слоја узорка код свих узорака и на мањим и на већим таласним дужинама тј.  $\lambda = 3,75$  и  $12,5 \mu\text{m}$ .

Дакле, при загревању спрашених узорака наслага, и слојеви дебљине  $\delta = 1 \text{ mm}$  су непровидни у довољној мери. Измерене емисивности  $\varepsilon_N$  слојева се сматрају правим емисивностима.

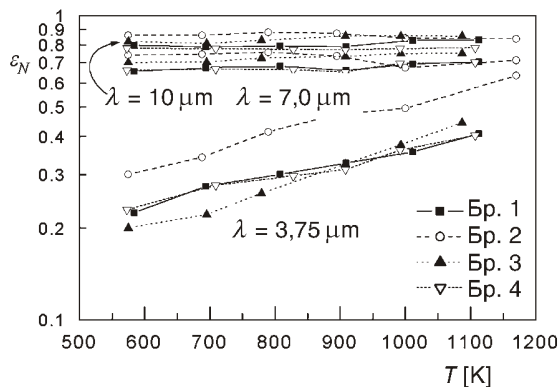
### *Спектрална емисивносћ наслага*

На сл. 3. приказани су спектри емисивности слојева пепела узорака број 1–4 од  $\delta = 5 \text{ mm}$  на  $600$ – $1100 \text{ K}$  у процесу загревања. Слојеви праха наслага пепела су при загревању углавном непровидни за инфрацрвено зрачење, тако да се спектри емисивности  $\varepsilon_N$  сматрају спектрима праве емисивности.

Емисивност слоја пепела расте са порастом таласне дужине по целом спектралном опсегу извршених мерења. То објашњава основну тенденцију температурске зависности укупне емисивности  $\varepsilon_N^{\text{tot}}$ . Емисивност  $\varepsilon_N$  је мала на мањим таласним дужинама, али се повећава са порастом температуре. Температурска зависност је изражена на мањим таласним дужинама и занемарљива на већим. Неки од опсега апсорпције се приписују вибрацијама у кристалној решетки неорганских састојака пепела: на пример, у спектрима узорка број 3 апсорпције  $\text{CaSO}_4$  око  $\lambda = 7,5 \mu\text{m}$  (као и у 9). Пошто апсорпција није толико јака као код метала, апсорпциона трака се јавља као врх у спектру емисивности. Међутим, дискусија тако локализоване апсорпције није релевантна за примену у термотехници и термоенергетици.

### *Утицај хемијског састава на емисивносћ*

Дијаграми на сл. 4. се заснивају на истим мерним подацима као и на сл. 3. На сл. 4. је приказана температурска зависност спектралних емисивности на  $\lambda = 3,75, 7,0$  и  $10 \mu\text{m}$  узорака број 1–4 од  $\delta = 5 \text{ mm}$  на  $600$ – $1100 \text{ K}$  у процесу загревања. Емисивност  $\varepsilon_N$  узорка број 2, који садржи 35%  $\text{FeO}$  и који је тамно смеђе боје, је за око 10% виша него код остала три узорка на  $\lambda = 3$ – $4 \mu\text{m}$ . Овај опсег таласних дужина је релевантан за термоенергетске системе око  $1000 \text{ K}$ . На вишим таласним дужинама у инфрацрвеној



Слика 4. Зависност спектралне емисивности ( $\lambda = 3,75, 7,0$  и  $10 \mu\text{m}$ ) узорака пепела од температуре (узорци број 1–4 са  $\delta = 5 \text{ mm}$  при  $T = 600\text{--}1100 \text{ K}$ )

области, зависност емисивности од хемијског састава и температуре пепела је занемарљива.

#### Синтеровање слојева пепела

На температурама изнад  $1000 \text{ K}$ , слојеви пепела се синтерују и стапају, и формирају се слојеви високе густине. Површине слојева узорака пепела се мењају из савршено-дифузно-рефлективних у спекуларно-рефлективне. Својства емисије што се правца тиче се, међутим, и даље сматрају дифузним [4]. Емисивност синтерованих слојева узорака може имати две супротне тенденције. То значи, када слој постане семи-транспарентан за инфрацрвено зрачење, расејање зрачења у слоју се смањи и привидни коефицијент апсорпције опадне. Права емисивност се смањује у односу на вредност пре синтеровања посебно на мањим таласним дужинама. Сматра се да измерене вредности привидне емисивности зависе од дебљине слоја узорка. Са друге стране, када семи-транспаренција није изражена, сматра се да пораст густине слоја узорка повећава емисивност на супрот тенденцији пре синтеровања.

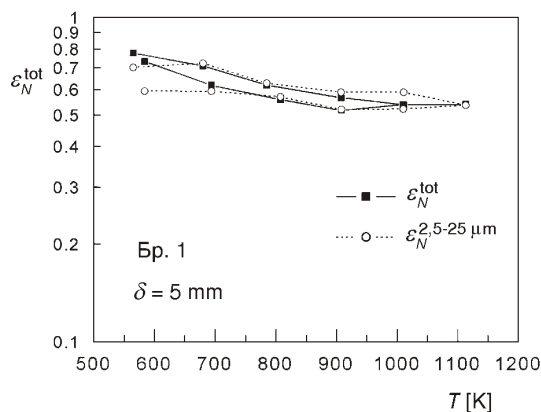
Код процеса хлађења након синтеровања, вредност емисивности  $\varepsilon_N$  (сл. 2) расте систематски код свих слојева узорака као и на мањим и већим таласним дужинама тј.  $\lambda = 3,75$  и  $12,5 \mu\text{m}$ . При процесу хлађења узорака број 1–3 емисивност  $\varepsilon_N$  не зависи изразито од дебљине  $\delta$  слоја узорка. У том случају, сматра се да се права емисивност  $\varepsilon_N$  мери и у процесу хлађења. Са друге стране, код узорка број 4, емисивност  $\varepsilon_N$  опада са порастом  $\delta$ . У овом случају се сматра да слој узорка слабо апсорбује зрачење, као и да се зрачење посуде узорка која је на вишој температури мери заједно са зрачењем горњих слојева узорка – у случају тањих слојева. Измерена привидна емисивност  $\varepsilon_N$  опада са порастом  $\delta$ . Сматра се да је привидна вредност за дебље слојеве компаративно ближа правој емисивности него вредност за тање слојеве. Поменути тенденција се поклапа са истом тенденцијом код вредности укупне емисивности  $\varepsilon_N^{\text{tot}}$  (сл. 5).

#### Укупна емисивност

На сл. 5. дата је температурска зависност укупне емисивности слоја пепела узорка број 1 дебљине  $\delta = 5 \text{ mm}$  на  $600\text{--}1100\text{--}600 \text{ K}$  у процесима загревања и хлађења.



Слика 5. Зависност укупне емисивности узорка наслага пепела од температуре (узорак број 1 са  $\delta = 5 \text{ mm}$  при  $T = 600\text{--}1100\text{--}600 \text{ K}$  у процесима загревања и хлађења)



На овој слици представљене су укупне емисивности два типа: укупна емисивност  $\epsilon_N^{\text{tot}}$  измерена уз помоћ укупног емисионог флуксметра, те интегрална емисивност  $\epsilon_N^{2,5-25 \mu\text{m}}$ , која се израчунава интеграцијом измерених спектралних емисивности  $\epsilon_N$  у опсегу  $\lambda = 2,5\text{--}25 \mu\text{m}$  нашег спектралног мерења. Пошто је више од 95 одн. 75% емитоване енергије црног тела на 600 и 1100 K, респективно, присутно у овој области, интегрална емисивност  $\epsilon_N^{2,5-25 \mu\text{m}}$  као и укупна емисивност  $\epsilon_N^{\text{tot}}$  се могу међусобно упоређивати. Температурске зависности ових двеју укупних емисивности показују задовољавајуће слагање.

У процесу загревања, укупна емисивност  $\epsilon_N^{\text{tot}}$  опада са порастом температуре. Када се слојеви пепела синтерују на температури изнад 1000 K,  $\epsilon_N^{\text{tot}}$  се повећа. Приликом процеса хлађења,  $\epsilon_N^{\text{tot}}$  расте са опадањем температуре. Као што је већ речено, пораст  $\epsilon_N$  са порастом таласне дужине као и пораст  $\epsilon_N$  са порастом температуре могу за резултат имати две супротне тенденције температурских зависности укупне емисивности  $\epsilon_N^{\text{tot}}$ . У овом истраживању спектралне и укупне емисије зрачења потврђено је да укупна емисивност  $\epsilon_N^{\text{tot}}$  опада са порастом температуре.

#### Коришћење спектра емисивности коїловских наслага за шїойлоїни прорачун коїла

У циљу што тачнијег дефинисања процеса преношења топлоте зрачењем у котловима односно у пећима широке употребе, с обзиром на присутне велике температурске варијације, коришћење података из спектра емисивности слојева пепела је у већој мери адекватно него традиционално коришћење података о укупној емисивности. Међутим, као што показује сл. 4, спектри емисивности слојева пепела зависе од хемијског састава, температуре као и топлотне предисторије пепела.

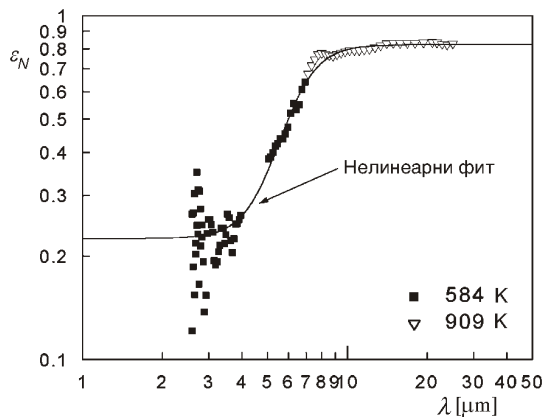
У циљу термичког прорачуна са жељеним степеном сигурности, а с обзиром на велике варијације хемијских и физичких својстава наслага на размењивачким површинама, треба одредити највећи и најмањи могући топлотни проток који се од пламена одн. врелих димних гасова предаје води која испарава односно пари која се прегрева. Максимални топлотни проток може да се израчуна коришћењем емисив-

ности црног тела. Са друге стране, минимални топлотни проток може да се одреди на основу вредности из спектра најмање могуће емисивности. Дакле, одређивање спектра минималне емисивности је значајно и са термотехничког односно термоенергетског становишта. Прецизно гледајући, вредност емисивности која се користи при традиционалном прорачуну размене топлоте зрачењем коришћењем геометријских фактора положаја је хемисферична емисивност  $\varepsilon_N$ , док је извршеним мерењима одређена нормална емисивност  $\varepsilon_N$  материјала наслага. Међутим, познато је да су дирекционе карактеристике емисивности слабо изражене [4], те се сматра да су вредности  $\varepsilon_N$  блиске вредностима  $\varepsilon_H$ . Бира се најнижа вредност емисивности за сваку тачку спектра емисивности свих узорака у опсегу температуре од 570–1170 К извршеног мерења ради добијања спектра са најнижом емисивношћу. Дискретне експерименталне тачке на сл. 6 су за узорак број 1. Спектар се састоји углавном од тачака спектра за температуре 584 и 904 К.

За реалну инжењерску примену, пожељно је да је спектар дат у облику непрекидне функције таласне дужине  $\lambda$  зрачења. На тај начин се врши екстраполација спектралног опсега и добија функција погодна за укључење у модел за симулацију сагоревања чврстог фосилног горива у пећима широке употребе. За корелисање експериментално добијених тачака предлажемо функцију следећег облика:

$$\varepsilon_H(\lambda) = \varepsilon_N(\lambda) \frac{\varepsilon_{\min} \varepsilon_{\max} \frac{\lambda}{\lambda_m}^p}{1 + \frac{\lambda}{\lambda_m}^p} \quad (5)$$

где су  $\varepsilon_{\min}$ ,  $\varepsilon_{\max}$ ,  $\lambda_m$  и  $p$  параметри предложене корелационе функције (5). Експерименталне тачке дате на сл. 6. су обрађене фитовањем помоћу методе најмањих квадрата и добијене су вредности сва четири параметра. У табл. 3. дате су вредности параметара одређене за све четири врсте пепела. На сл. 6. је помоћу пуне линије приказан спектар минималне емисивности  $\varepsilon_N$  добијен коришћењем једн. (5) са вредностима параметара из табл. 3. за случај узорка број 1. Овом линијом је извршена екстраполација изван граница опсега таласних дужина експеримента.



Слика 6. Представљање спектра емисивности наслага пепела континуалном функцијом (узорак број 1)

То се сматра оправданим, јер су у дубокој инфрацрвеној области, неколико десетина микрометара изван експерименталног опсега, присутне области високе апсорпције на основу механизма вибрације у кристалној решетки комплексних неорганских кристала присутних у пепелу, тако да се ту одржава интензивна апсорпција одн. висока емисивност. У блиској инфрацрвеној области тј. на таласним дужинама нижим од вредности у експерименталном опсегу, „леви” крај Планкове расподеле који се множи са емисивношћу има довољно ниску вредност, тако да груба претпоставка о вредности емисивности у овој области не утиче на израчунате вредности топлотног протока у већој мери.

Комбинација једн. (5) и табл. 3 представља меродаван приступ. Ова метода може да се употреби такође и за остале узорке број 2-4. За сваку зону пећи односно ложишта котла могу да се користе одговарајући експериментални резултати. Добијени резултати се могу применити у оквиру модела за симулацију сагоревања чврстог фосилног горива у пећима широке употребе, а у којима сагорева сличан угаљ.

**Таблица 3. Вредности параметара функције која корелише емисивност пепела и таласну дужину зрачења**

Број узорка	$\varepsilon_{\min}$	$\varepsilon_{\max}$	$\lambda_m$ [mm]	$p$
Број 1	0,225	0,821	6,15	6,69
Број 2	0,261	0,855	6,13	6,23
Број 3	0,212	0,842	5,99	7,48
Број 4	0,217	0,763	5,19	7,55

## Закључци

У циљу што тачнијег дефинисања процеса преношења топлоте зрачењем у оквиру модела за симулацију сагоревања чврстог фосилног горива у пећима широке употребе, извршено је експериментално одређивање карактеристика топлотног зрачења слојева пепела спрашеног угља, као и анализа резултата са аспекта вршења топлотног прорачуна пећи са одговарајућим степеном сигурности. Изведени су следећи закључци:

- (1) Слојеви спрашених наслага пепела су непровидни за инфрацрвено зрачење. Измерене вредности представљају праву емисивност слојева. Емисивност расте са порастом таласне дужине зрачења. Емисивност такође расте са порастом температуре слоја посебно на нижим таласним дужинама. Зависност спектра емисивности од хемијског састава пепела није нарочито изражена.
- (2) На температурама изнад 1000 К слојеви наслага пепела се синтерују и стварају се чврсти слојеви повишене густине. Емисивности тих слојева имају више вредности него пре синтеровања. Код једне врсте слоја пепела, након синтеровања долази до семи-транспаренције у опсегу нижих таласних дужина.
- (3) Укупна емисивност слојева пепела опада са порастом температуре.
- (4) При термичком прорачуну пећи са жељеним степеном сигурности, за насlage пепела код којих постоје знатне варијације како физичких тако и хемијских

својстава, препоручује се коришћење спектра емисивности одређеног коришћењем једн. (5).

### Захвалност

Аутори изражавају своју искрену захвалност проф. др Т. Макино (Toshiro Makino) са Кјото Универзитета, Кјото, Јапан, за његову непроцењиву помоћ у виду савета и подршке приликом рада на овом истраживању.

### Ознаке

$A, B$	– константе система за оптичко мерење, [-] или [K <sup>-4</sup> ]
$C_2$	– Планкова друга константа зрачења, = 0,014388 m·K
$d$	– пречник честице, [m]
$p$	– параметар у једн. (5)
$T$	– температура, [K]

#### Грчки симболи

$\delta$	– дебљина слоја узорка, [mm]
$\varepsilon$	– емисивност, [-]
$\varepsilon_{\max} \varepsilon_{\min}$	– параметри у једн. (5), [-]
$\lambda$	– таласна дужина зрачења у вакууму, [m]
$\lambda_m$	– параметар у једн. (5), [m]
$v$	– сигнал система за оптичко мерење пропорционалан интензитету зрачења, [mV]
$\rho$	– густина слоја узорка, [kg·m <sup>-3</sup> ]

#### Индекси

$pr$	– привидна
$ct$	– црног тела
$H$	– хемисферична
$i$	– одговара свакој вредности таласне дужине
$j$	– одговара свакој вредности температуре
$N$	– нормална
$U$	– узорак
$0$	– собна температура

#### Експоненцији

2,5–25 $\mu\text{m}$	– спектрално-интеграљена у опсегу таласних дужина $\lambda = 2,5\text{--}25 \mu\text{m}$
tot	– укупна

### Литература

- [1] Mulcahy, M. F. R., Boow, J., Goard, P. R. C., Fireside Deposits and Their Effect on Heat Transfer in a Pulverized-Fuel-Fired Boiler, Part I, *Journal of Institute of Fuel*, 39 (1966), pp. 385–394
- [2] Mulcahy, M. F. R., Boow, J., Goard, P. R. C., Fireside Deposits and Their Effect on Heat Transfer in a Pulverized-Fuel-Fired Boiler, Part II, *Journal of Institute of Fuel*, 39 (1966), pp. 394–398

- [3] Boow, J., Goard, P. R. C., Fireside Deposits and Their Effect on Heat Transfer in a Pulverized-Fuel-Fired Boiler, Part III, *Journal of Institute of Fuel*, 42 (1969), pp. 412–419
- [4] Brajuskoviš, B., Uchiyama, M., Makino, T., Experimental Investigation of Total Emittances of Power-Plant Boiler Ash Deposits, *Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics*, 19 (1991), pp. 605–612
- [5] Wall, T. F., Bhattacharya, S. P., Zhang, D. K., Gupta, R. P., He, X., The Properties and Thermal Effects of Ash Deposits in Coal-Fired Furnaces, *Progress in Energy and Combustion Science*, 19 (1993), pp. 487–504
- [6] Bhattacharya, S. P., Wall, T. F., Arduini-Schuster, M., A Study on the Importance of Dependent Radiative Effects in Determining the Spectral and Total Emittance of Particulate Ash Deposits in Pulverized Fuel Fired Furnaces, *Chemical Engineering and Processing*, 36 (1997), pp. 423–432
- [7] Bhattacharya, S. P., Apparent Emittance of Non-Isothermal Particulate Deposits, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 26 (1999), pp. 771–780
- [8] Bhattacharya, S. P., A Theoretical Investigation of the Influence of Optical Constants and Particle Size on the Radiative Properties and Heat Transfer in Ash Clouds and Deposits, *Chemical Engineering and Processing*, 9 (2000), pp. 471–483
- [9] Touloukian, Y. S., DeWitt, D. P., Thermal Radiative Properties of Non-Metallic Solids, Thermophysical Properties of Matter, *TPRC data series*, Vol. 8, IFI/Plenum, 1972

## Abstract

# Research on Emittance Spectra of Deposits from Solid Fossil Fuel Combustion in Wide Range Use Furnaces

by

*Aleksandar SALJNIKOV<sup>1</sup>, Biljana VUČIĆEVIĆ<sup>2</sup>, Žarko STEVANOVIĆ<sup>2</sup>  
Djordje KOZIĆ<sup>1</sup>, Kosta MAGLIĆ<sup>2</sup>, and Predrag RADOVANOVIĆ<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Faculty of Mechanical Engineering, University of Belgrade,  
Belgrade, Serbia and Montenegro

<sup>2</sup> VINČA Institute of Nuclear Sciences, Belgrade, Serbia and Montenegro

This paper describes research on thermal radiation characteristics of ash deposits created as a result of solid fossil fuel combustion in wide range use furnaces. Measurements yielded spectra of normal emittance in the 2.5–25 μm wavelength range and total normal emittance values of millimeter order thick samples of four ash types in the 600–1100 K temperature range during heating and cooling. It was concluded that deposit powder layers are opaque to infrared radiation. Spectral emittance increases with growth of radiation wavelength and ash temperature. Influence of chemical composition of the

ashes upon spectral emittance is not pronounced. Total emittance decreases with temperature increase. Deposit layers get sintered and fused at temperatures above 1000 K, the emittance of the sintered layer remaining above the emittance of the unsintered layer. One type of ash layer becomes semi-transparent upon sintering. Obtained results have been summed up from the thermal engineering aspect and a method is proposed for their correlating and utilizing within the model for simulation of solid fossil fuel combustion in wide range use furnaces.

Key words: *thermal radiation, spectroscopical measurement, emittance, ash deposits, combustion*

*Одговорни аутор* / Corresponding author (A. Saljnikov)  
E-mail: [asaljnikov@mas.bg.ac.yu](mailto:asaljnikov@mas.bg.ac.yu)