

Милица Р. Младеновић^{1*}, Милијана Ј. Пајриќа¹, Драгољуб В. Дакић²
Сиван Ђ. Немода¹, Александар М. Ерић¹, Мирко С. Комајина³

¹ Лабораторија за термотехнику и енергетику,

Институт за нуклеарне науке „Винча”, Универзитет у Београду, Београд, Србија

² Иновациони центар Машинског факултета, Универзитет у Београду, Београд, Србија

³ Машински факултет, Универзитет у Београду, Београд, Србија

Вертикални профил температуре у инсталацији за сагоревање отпадних горива са флуидизованим слојем

Оригинални научни рад

Овај рад је прилоз исцртавању сагоревања чврстих и течних отпадних горива. У течна отпадна горива чије одлагање представља еколошки проблем убрајамо талога из резервоара сирове нафте као и коришћена јестива/минерална уља и глицерин као нус-продукт производње биодизела. Поред тога, ове материје, због неуједначеног састава и густина као и високог удела баласта, се не могу сагоревати у конвенционалним ложиштима, па је технологија погодна за њихову оптималну дезинтеграцију флуидизовани слој јер омогућава сагоревање најразличитијих врста горива неуниформног састава. У чврста отпадна горива убрајамо и ванбилансне резерве угља (ситне фракције, са високим садржајем минералних материја и ниском оптималном моћи) које је потребно корисити рационалније, што ове подразумева примену ложишта са флуидизованим слојем. У котловима са флуидизованим слојем могу се сагоревати чврста горива са 85% инертних материја, са ефикасним одсуствовањем до-давањем кречњака директно у ложиште, са ниском емисијом NO_x, што овој технологији даје значајну предност у поређењу са другим технологијама сагоревања.

У раду је даје опис експерименталне инсталације, као и резултати експериментална, са нагласком на расподелу температуре по висини ложишта, у циљу одређивања зоне интензивног сагоревања у зависности од карактеристика горива.

Кључне речи: течна отпадна горива, нисковредни угљеви, флуидизовани слој

Увод

Са тачке гледишта потреба за уклањањем отпадних и непотребних материја из процеса производње, привреда Србије исказује потребу за уклањањем и искоришћавањем различитих материјала попут: одсева угља из више рудника са подземном експлоатацијом, ванбилансних резерви угља, талога из резервоара за сирову

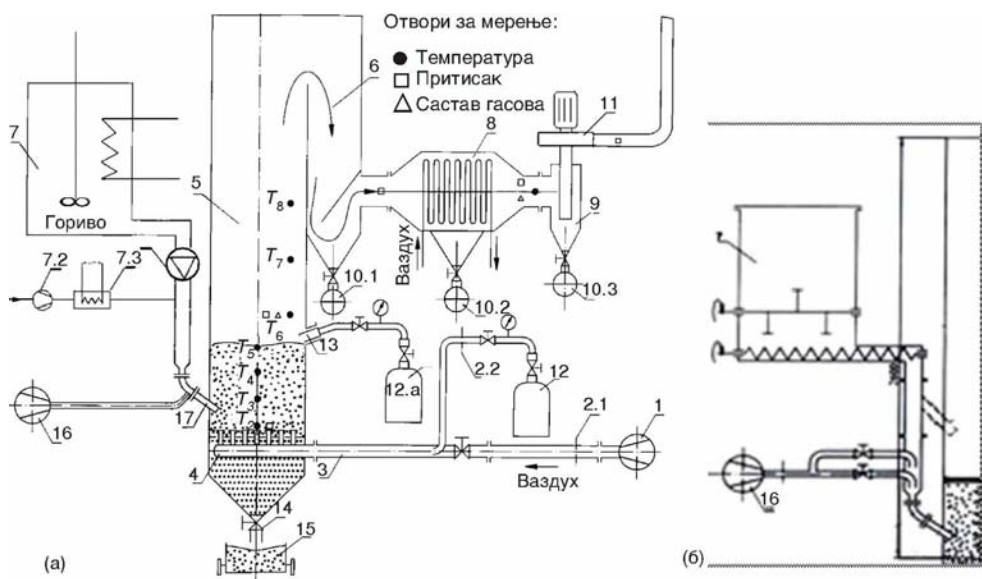
* Одговорни аутор; електронска адреса: mica@vinca.rs

нафту у рафинеријама, талог из резервоара мазута и горива на бензинским пумпама, запрљаног глицерина из производње биодизела, искоришћење истрошених уља из ваљаоница итд. Предмет овог рада је термичка дезинтеграција ових отпадних материја у флуидизованом слоју (ФС) уз искоришћење енергетских ефеката, а у складу са нормама о заштити животне средине.

У раду је дата анализа резултата сагоревања у флуидизованом слоју (ФС) више врста течних горива: уља, глицерина, отпадних масти из хладне ваљаонице железаре у Смедереву, нафтног муља из рафинерије нафте у Панчеву и ситних гранулација угља Лубница као репрезента сагоревања чврстог отпадног горива у ФС. Акцент је овом приликом стављен на промену температуре по висини ложишта у зависности од карактеристика горива.

Опис експерименталне инсталације

Експериментална инсталација (сл. 1) је димензионисана, пројектована и изграђена на такав начин да се резултати истраживања могу употребити као пројектни параметри за реална постројења за сагоревање течних или чврстих горива.



Слика 1. Шема експерименталне инсталације са системом за дозирање горива

(1) – дувалка примарног ваздуха, (2.1–2.2) мерни отвори, (3) – електрични грејач, (4) – комора са дисперзионим ваздухом, (5) – ложиште са флуидизованим слојем (1. промаја), (6) – комора за издавање честица (2. промаја), (7) – систем за дозирање горива: (а) течно – 7.1 пумпа за дозирање, 7.2 – дувалка за носећи ваздух, 7.3 – грејач носећег ваздуха; (б) чврсто – јужни дозатор и дувалка за ваздух, (8) – хладњак димног гаса, (9) циклонски сепаратор честица, (10.1–10.3) – посуде за одлажање честица, (11) – вентилатор димног гаса са фреквенцијским регулатором, (12.a) – боца пропан-бутана, (13) – жорионик за пошталу, (14) – вентил за издавање материјала слоја, (15) – посуда за сакупљање материјала слоја, (16) – дувалка за хлађење ваздуха млазнице, (17) – млазница

Гориво се уводи у инсталацију преко система за дозирање (7) кроз цевну млазницу (17) у ФС. Ваздух се уводи кроз дистрибутор гаса (4). Димни гасови догоревају у простору изнад ФС. Материјал слоја је кварцни песак средњег пречника 0,8 mm, и насипне густина 1310–1585 kg/m³. Висина слоја се кретала од 323–400 mm у различитим радним режимима.

Најкрупније честице пепела које нису остале унутар ФС уклањају се из струје димног гаса одмах након изласка из ложишта (10.1). Потом димни гасови пролазе кроз хладњак (размењивач топлоте хлађен ваздухом) (8), испод чега се, такође уклањају честице и сакупљају у суду (10.2). Најситније честице се уклањају из струје димног гаса у циклону (9). Димни гасови из којих су уклоњене честице се избацују у атмосферу деловањем вентилатора димног гаса. Више о експерименталној апаратури могуће је наћи у [1–5].

Испитивање подобности испитиваних горива за сагоревање у ФС

Испитивана горива:

- отпадно јестиво уље,
 - глицерин-нуспродукт производње биодизела,
 - истрошена уља и масти из погона хладне ваљаонич,
 - талог из рафинерије нафте Панчево, и
 - ситне отпадне гранулације угља Лубница,
- сагоревана су у ФС у стационарним режимима.

Испитивање сагоревања јестивог уља, при различитим дубинама урањања млазнице (90 и 130 mm)

Да би се дефинисали параметри сагоревања и дубина урањања млазнице дозатора, експерименти су најпре извођени с јестивим уљем. Јестиво уље је изабрано за тзв. модел гориво зато што, за разлику од других испитиваних горива, нема механичке и друге нечистоће и мање је вискозно од реалног течног горива, те се лако дозира. Поред тога јефтино је и лако доступно. Реални услови су симулирани додавањем воде у модел гориво (табл. 1.)

Таблица 1. Техничка и елементарна анализа сунцокретовог уља

ДТМ [MJkg ⁻¹]	37,1	С [%]	77,6
Влага [%]	0,1	Н [%]	11,5
Пепео [%]	0	С [%]	0
Испарљиво [%]	99,17	Н [%]	0
Неиспарљиво [%]	0,73	О [%]	10,9

Праћена су три стационарна режима сагоревања модел горива, за различите дубине млазнице у ФС и за различит састав модел горива, које је мењано додавањем воде у уље, и то:

Режим I – Сагоревање горива при мањој дубини урањања млазнице у ФС ($0,6 H_0 = 130$ mm од врха печурки дистрибутора ваздуха; H_0 – висина активног дела насутог слоја),

Режим II – Сагоревање горива при већој дубини урањања млазнице у ФС ($0,7 H_0 = 90$ mm од врха печурки дистрибутора ваздуха), и

Режим III – Сагоревање смеше горива и воде при већој дубини урањања млазнице у ФС ($0,7 H_0 = 90$ mm од врха печурки дистрибутора ваздуха).

Приликом мерења, континуално је праћена температура у слоју и изнад њега по висини ложишта, као и паралелна гасна анализа.

У свим режимима добијено је стабилно сагоревање, уз средњу температуру у слоју $850\text{--}900$ °С, која би се усталила врло брзо након отпочињања процеса. Постигнута је веома повољна емисија [6] продуката сагоревања, са веома ниским садржајем угљен-моноксида (табл. 2).

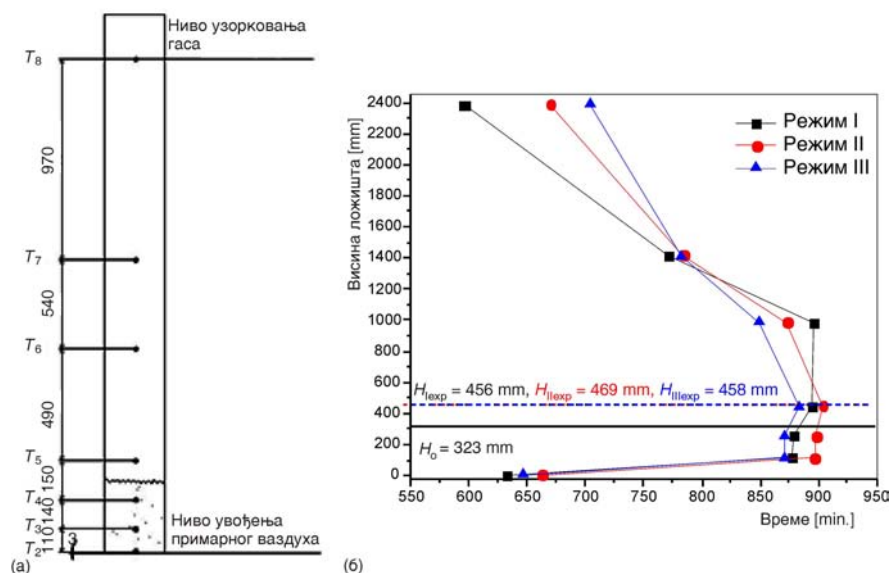
Таблица 2. Радни параметри експерименталног ложишта са ФС за сагоревање јестивог уља

Режим	Проток горива [h^{-1}]	Температуре активног дела ФС [°С]				Састав гаса						λ	Проток примарног ваздуха [h^{-1}]	Проток секундарног ваздуха [h^{-1}]	v_f [ms^{-1}]	H_{exp} [mm]
		T_2	T_3	T_4	T_5	CO_2 [%]	O_2 [%]	CO [ppm]	SO_2 [ppm]	NO [ppm]	NO_2 [ppm]					
I	4,2	633	877,9	879,3	894,8	6,84	12,62	178,28	0,03	12,39	0	2,52	116580	2410	1,52	456
II	3,4	663,3	898,3	899,2	904,9	5,1	14,95	16,18	0,0	12,18	0	3,49	122865	2300	1,62	469
III	3,6	645,8	870,8	870,8	883,6	4,73	15,32	2,08	0,0	10,37	0,0	3,37	118780	2500	1,53	458

Како се са дијаграма види (сл. 2), температуре у слоју су скоро исте за сва три радна режима, што указује на добру организацију сагоревања у слоју. Температура непосредно уз слободну површину експандираног слоја T_5 се не разликује много од температура T_3 и T_4 у слоју што указује на то да се зона интензивног сагоревања налази у слоју, чиме се постиже стабилан процес.

Утврђено је да дубље урањање млазнице у ФС даје стабилније одвијање процеса, повлачење зоне интензивног сагоревања дубље у слој и смањење догоревана изнад слоја (сл. 2). Стога је овај положај млазнице усвојен за испитивање у режиму сагоревања емулзије горива и воде.

Емулзија, у односу $3,5$ l течног горива и 1 l воде (при приближно истом протоку ваздуха за флуидизацију као за чисто модел гориво), дала је такође стабилан режим са веома сличним температурским профилем, али са нешто нижим температурама, при сличном вишку ваздуха, као код режима II. Ниже температуре су логична последица повећаног садржаја баласта-влаге и стога, смањења топлотне моћи горива унетог у слој.



Слика 2. Средња температура по висини ложишта:
 (а) за све радне режиме, (б) позиција термопарова у ФС ложишта
 (слику можете видети у електронској верзији у пуном колору)

Висина експандираног слоја, тј. зона распрскавања мехурува је одређена на основу једначине експанзије ФС (1) [7]:

$$\frac{H}{H_{mf}} = \frac{1}{1} \frac{\varepsilon_{mf}}{\varepsilon} \frac{\rho_{mf}}{\rho_{\varepsilon}} \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{18P\varepsilon}{Ar} \cdot 0,36 Re^2 \quad (2)$$

при чему је: $Re = v_r d_p / \nu_f$ – Рејнолдсов број за честице, [-]; $Ar = g d_p^3 \rho_f (\rho_p - \rho_f) / \mu_f^2$ – Архимедов број, [-]; $d_p = 0,8$ mm – пречник честице, [m]; $\varepsilon_{mf} = 1 - (\rho_b / \rho_p) = 0,454$ – порозност слоја за режим минималне флуидизације, [-]; $\rho_p = 2400$ – густина честица [kgm^{-3}].

Испитивање сагоревања испрошених уља и масти из хладне ваљаонице

Испитивано гориво – истрошена уља и масти из хладне ваљаонице – сагоревана су у ФС у три стационарна режима:

Режим I – гориво у доставном стању, без додавања воде,

Режим II – однос горива и воде 60:40%, и

Режим III – однос горива и воде 50:50%.

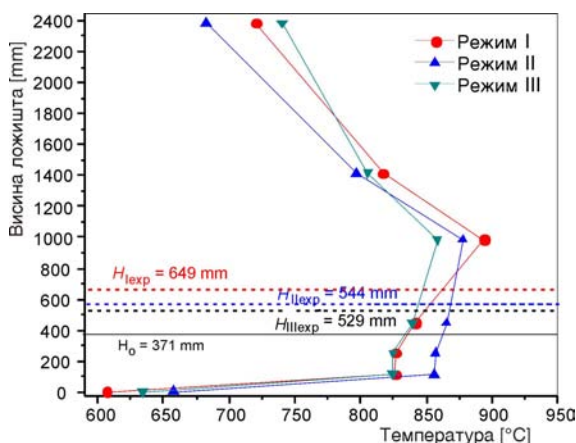
Дубина урањања млазнице је $0,7 H_0$ (120 mm од врха печурки дистрибутора ваздуха). Материјал слоја чини кварцни песак средњег пречника 0,8 mm, насипне

густине 1585 kg/m^3 . Висина слоја је 371 mm . Гориво је хомогенизовано константним мешањем електричном мешалицом загрејано до $70 \text{ }^\circ\text{C}$ (табл. 3).

Таблица 3. Техничка анализа истрошених уља и масти из хладне ваљанице

Гориво	Истрошена уља и масти
Влага [%]	13,21
Пепео [%]	2,27
Укупни сумпор [%]	0,72
Неиспарљиво [%]	2,78
Фиксни С [%]	0,51
Испарљиво [%]	84,01
Сагорљиво [%]	84,52
ГТМ [kJkg^{-1}]	32133
ДТМ [kJkg^{-1}]	29516*

* Доња топлотна моћ је израчуната на основу елементарне анализе мазута, који се може сматрати најсличнији испитиваном гориву



Слика 3. Средња температура по висини ложишта, за све радне режиме

(слику можете видети у електронској верзији у пуном колору)

Другим речима, мешањем горива са водом и смањењем брзине флуидизације практично се продужава време боравка пара горива у слоју (резидентно време),

Како се са дијаграма види (сл. 3), за све режиме температуре у слоју T_3 и T_4 су скоро исте што указује на добру организацију сагоревања у слоју. Температура непосредно уз слободну површину експандираног слоја T_5 се не разликује много од температура T_3 и T_4 у слоју за сва три режима, али је ипак виша (посебно за први режим), што значи да мехурови испуњени смешом горива и ваздуха напуштају слој пре потпуног сагоревања горива. То значи да се зона интензивног сагоревања налази непосредно изнад слоја за све радне режиме, што и јесте карактеристика горива са високим садржајем волатилна тј. испаривих сагорљивих материја. Тренд да течна високо волатилна горива, нагло испаравају при уласку у загрејан ФС и брзо пролазе кроз слој без адекватног мешања са ваздухом с последицом премештања зоне сагоревања из слоја на зону изнад слободне површине ФС, је констатован у радовима више аутора [8–13].

Поређењем температурских профила за све режиме, види се да смањивање брзине флуидизације и мешање горива са водом утиче на смањивање разлика температура у слоју и непосредно изнад слоја. Могући разлог за уједначеније сагоревања горива помешаног с водом је боље распршивање при изласку из млазнице због нагле експанзије водене паре при уласку у загрејани ФС. Други могући разлог, наведен од више аутора [14–17], је да се мешањем горива са водом продужава време деволатилизације, јер повећани садржај воде одлаже тренутак издвајања гасова.

остварује се боље мешање са кисеоником па мање волатила напушта слој пре потпуног сагоревања.

Садржај CO је у свим случајевима знатно нижи од стандардом дозвољених референтних вредности, а такође и за NO, изузев у режиму II и III (табл. 4). У овим експериментима, због квазиконтинуалног дозирања горива (проток горива је регулисан непосредним искључивањем и укључивањем пумпе за дозирање), јављају се пикови у емисији NO_x. У реалним условима, када је доток горива константан и λ мање, и концентрација NO ће бити мања.

Таблица 4. Радни параметри експерименталног ложишта са ФС за сагоревање истрошених уља и масти

Режим	Проток горива [kg h ⁻¹]	Температуре активног дела ФС [°C]				Састав гаса						λ	Проток примарног ваздуха [lh ⁻¹]	Проток секундарног ваздуха [lh ⁻¹]	v _i [ms ⁻¹]	H _{exp} [mm]
		T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	CO ₂ [%]	O ₂ [%]	CO [ppm]	SO ₂ [ppm]	NO [ppm]	NO ₂ [ppm]					
I	4,18	607	826	826,6	841	7	11,8	<63	0	12	0	2,29	131295	2780	1,63	649
II	5,26	657,8	855,9	856,7	864,9	5,46	14,1	0	0	55	0	3,08	75817	1800	0,97	544
III	6,33	634,6	824,3	825	839,6	5,06	14,7	0	0	42	0,0	3,35	68141	1800	0,85	529

Испитивање нафтиног муља

Испитивано гориво – муљ из резервоара сирове нафте помешан је с водом у односу 40:60. Материјал слоја био је кварцни песак средњег пречника 0,8 mm насипне густине 1475 kg/m³, а висина слоја 323 mm. Дубина урањања млазнице је 0,7 H_o (93 mm од врха печурки дистрибутора ваздуха). Мешавина муљ/вода је хомогенизована мешањем електричном мешалицом и загрејана до 85 °C (табл. 5).

У изабраном узорку оригиналног горива (галога из нафтних резервоара) било је 45,77% масеног удела воде и 23,37% масеног удела пепела, али због потешкоћа са дозирањем узорак је мешан са додатном количином воде. Додато је 60% воде на укупну масу горива, тако да су ефективни масени удели влаге и пепела у гориву које је дозирао у ложиште, били: 78,31% и 9,35%, респективно.

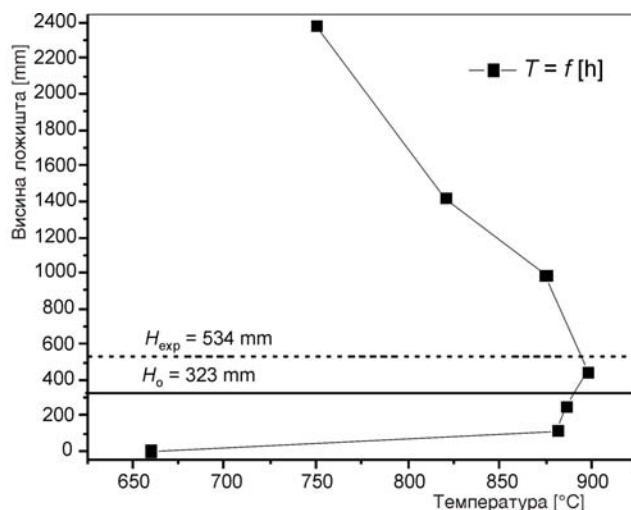
Таблица 5. Техничка анализа муља из резервоара сирове нафте

Гориво	Истрошена уља и масти
Влага [%]	45,77
Пепео [%]	23,37
Укупни сумпор [%]	2,20
Неиспарљиво [%]	25,14
Фиксни С [%]	1,17
Испарљиво [%]	29,09
Сагорљиво [%]	30,86
ГТМ [kJkg ⁻¹]	11417
ДТМ [kJkg ⁻¹]	11260

Талог из резервоара сирове нафте у мешавини с водом је врло тешко сагоревати без подршке додатног висококалоричног горива, чак и у ФС. Због тога је у ложиште додата смеша пропана и бутана као подршка сагоревању датог горива са високим садржајем воде (табл. 6). Ова смеша тешког течног горива и гаса је стабилно сагоревала, а у стационарним условима су забележене усредњене вредности приказане у табlici. Као што се види, смеша нафтног муља и гаса, са ефективним садржајем воде од 67,51% масеног удела воде и 8,06% масеног удела пепела стабилно сагорева на температурама око 900 °С, уз веома ниску концентрацију CO* у

Таблица 6. Радни параметри експерименталног ложишта са ФС за сагоревање талоба из резервоара сирове нафте

Масени проток горива [kg h ⁻¹]	Температуре активног дела ФС [°С]				Састав гаса				λ	Проток примарног ваздуха [l h ⁻¹]	Проток секундарног ваздуха [l h ⁻¹]	v_f [ms ⁻¹]	H_{exp} [mm]
	T_2	T_3	T_4	T_5	CO ₂ [%]	O ₂ [%]	CO [%]	SO ₂ [%]					
13,7 муљ + вода; 2,61 гас	660	882	886	898	5,04	12,77	0,04	<0,01	2,57	128133	2650	1,68	534



Слика 4. Средња температура по висини ложишта

продуктима са горевања. Са дијаграма (сл. 4) се такође види да се сагоревање одвија унутар слоја. За разлику од претходног случаја температура у зони запљускивања слоја T_5 је виша од температуре T_6 знатно изнад слоја, што указује да је зона сагоревања лоцирана у слоју и зони распрскавања мехурова. Мешање овог горива с водом има исти ефекат на побољшање распршивања горива на излазу из млазнице у ФС продужење резидентног времена као и у претходним случајевима.

* Уредба о граничним вредностима емисије загађујућих материја у ваздуху („Службени гласник РС”, број 71/2010), 4. октобар 2010.

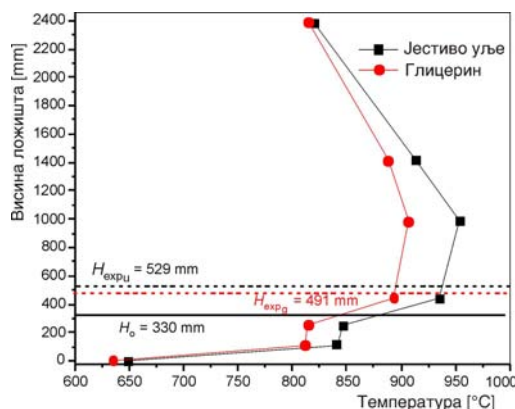
Упоредно испитивање сагоревања уља и глицерина

Главни нуспроизвод производње биодизела је глицерин (од полазне сировине за добијање биодизела, нпр. искоришћених јестивих уља, 10% масених отпада на глицерин). Већа потражња за биодизелом може довести до презасићености тржишта глицерином па се и он може третирати као отпад и користити као „алтернативно” гориво, стога је и овој врсти течног горива посвећена пажња у раду.

Материјал слоја чини кварцни песок $d_{sr} = 0,8 \text{ mm}$, насипне густине 1475 kg/m^3 , висина слоја је $H_0 = 323 \text{ mm}$. Дубина урањања млазнице је $0,7 H_0 = 93 \text{ mm}$ од врха печурки дистрибутора ваздуха).

На сл. 5 је дат распоред температуре по висини ложишта, а у табл. 7 је дата карактеризација горива – уља и глицерина из које се види да глицерин има знатно нижу топлотну моћ од уља.

Из дијаграма на сл. 5. може се уочити увлачење зоне сагоревања у слој приликом прелаза са уља на глицерин и смањење разлика између температура у слоју и непосредно изнад њега (T_3, T_4, T_5, T_6), при сличном вишку ваздуха (табл. 8). Одавде следи да глицерин има знатно боље физичко-хемијске карактеристике за сагоревање у ложишту са ФС од уља, јер лакше испарава и боље се меша са честицама загрејаног инертног материјала ФС.



Слика 5. Средња температура по висини ложишта
 (слику можете видети у електронској верзији у пуном колору)

Испитивање нисковредних фракција уља Лубница у ФС

Млевени угаљ ($0 < d < 0,5 \text{ mm}$) је пнеуматски дозиран у ФС. Укупна активна висина фиксног ФС била је 400 mm . Дубина урањања млазнице је $0,6 H_0$ (150 mm од врха печурки дистрибутора ваздуха). Експерименти су рађени на две температуре ФС:

Режим I – температура слоја $850\text{--}860 \text{ }^\circ\text{C}$, и

Режим II – температура слоја $820\text{--}830 \text{ }^\circ\text{C}$.

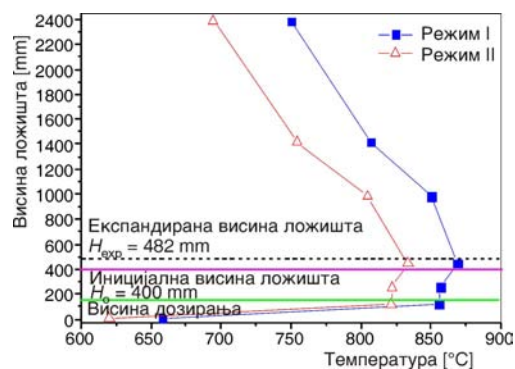
Таблица 7. Техничка и елементарна анализа

Гориво	Сунцокретово уље	Глицерин
Влага [%]	0,1	–
Неиспарљиво [%]	0,73	–
Испарљиво [%]	99,17	–
ДТМ [kJkg^{-1}]	37,1	17
С [%]	77,6	39,1
Н [%]	11,5	8,7
С [%]	0	–
Н [kJkg^{-1}]	0	–
О [kJkg^{-1}]	10,9	52,2

Таблица 8. Радни параметри експерименталног ложишта са ФС за сагоревање глицерина

Масени проток горива [kg h ⁻¹]	Температуре активног дела ФС [°C]				Састав гаса					λ	Проток примарног ваздуха [l/h]	Проток секундарног ваздуха [l/h]	v_t [ms ⁻¹]	H_{exp} [mm]	
	T_2	T_3	T_4	T_5	CO ₂ [%]	O ₂ [%]	CO [ppm]	SO ₂ [ppm]	NO _x [ppm]						
Сунцокретово уље	4,12	649,3	840,9	842,9	935,3	5,52	13,76	–	–	0	2,79	121402	2480	1,56	529
Глицерин	7,92	634,4	811,3	813,4	893,2	6,11	14,8	–	–	0	2,9	102183	2480	1,28	491

На сл. 6 је дат распоред температуре по висини ложишта при сагоревању ситних гранулација угља Лубница, а у табл. 9 је дата карактеризација овог горива.

**Слика 6. Средња температура по висини ложишта**

(слику можете видети у електронској верзији у пуном колору)

Регулација температуре ФС у оба радна режима извођена је преко заустављања дозирања горива у кратким интервалима. Лако је приметити да су температуре T_3 и T_4 скоро идентичне током целог истраживања (T_{3cp} , T_{4cp}), и температура T_5 непосредно испод површине слоја је незнатно виша од температуре у самом слоју (сл. 6. и табл. 10), што указује да се интензивно сагоревање одвија у слоју или у зони распривања мехурова тзв. *splash* зоне.

Као што се види из приказаних резултата мерења у табл. 10, концентрација CO у димном гасу била је знатно нижа од највиша законом дозвољене ($CO \ll 250 \text{ mg/m}^3$)

Таблица 9. Техничка и елементарна анализа угља Лубница у доставном стању

Влага [%]	30,81
Пепео [%]	16,16
Укупни сумпор [%]	1,68
Неиспарљиво [%]	40,32
Фиксни C [%]	24,16
Испарљиво [%]	28,87
Сагорљиво [%]	53,02
ДТМ [%]	13625
C [%]	36,58
H [%]	2,48
S [%]	1,20
N [%]	0,97
O [%]	11,79

Таблица 10. Радни параметри експерименталног ложишта са ФС за сагоревање угља Лубница

Режим	Масени проток горива [kg h ⁻¹]	Температуре активног дела ФС [°C]				Састав гаса					λ	Проток примарног ваздуха [l/h]	Проток секундарног ваздуха [l/h]	v_f [ms ⁻¹]	H_{exp} [mm]
		T_2	T_3	T_4	T_5	CO ₂ [%]	O ₂ [%]	CO [ppm]	SO ₂ [ppm]	NO [ppm]					
I	7,77	658,3	855,7	856,4	868,7	7,9	13,8	20,2	940	385	2,91	73419	15128	1,94	482
II	8,00	620,4	821,4	822,3	833,6	7,1	13,9	10,1	730	406	2,96	76041	15128	0,94	481

[6]. То, такође, указује да су губици услед несагорелог у димном гасу занемарљиви. Садржај несагорелог у летећем пепелу је, такође, занемарљив [4].

Коментар квантитета сагоревања, са аспекта испуњавања захтева закона о заштити околине, је донекле мање повољан. Концентрација SO₂ далеко премашује највише дозвољене границе. Током експеримената показано је да се концентрације и емисија SO₂ може релативно једноставно снизити додавањем кречњака у слој. Додатно, концентрација азотних оксида у димном гасу је била виша од очекиване за ту технологију сагоревања. Основни разлог за то био је висок ниво вишка ваздуха током експеримената, због метода регулације дозирања горива. У реалним условима у котловима са ФС очекује се нижа концентрација NO_x. У сваком случају, треба наћи начин за додатно снижавање концентрације азотних једињења у димном гасу, додавањем амонијака, рецикулацијом димних гасова или на неки други начин.

Закључак

На основу изложених резултата испитивања неколико горива, која су се разликовала по саставу и стању, могу се извући следећи закључци.

Течна горива са високим садржајем волатила показују тенденцију да сагоревају изнад слоја, или у близини слободне површине – па се зато препоручује већа висина флуидизованог слоја, дозирање „у слој” и мањи степени флуидизације.

Параметри сагоревања се побољшавају при дубљем урањању млазнице у слој.

Мешање течног горива с водом не само да олакшава дозирање, већ и доводи до померања зоне интензивног сагоревања према средишњем делу слоја, уз смањење емисије CO.

Због велике вискозности и лаког стишњавања нафтног муља у линији за дозирање неопходно је његово мешање са водом и грејање линије за дозирање (што је потребно и код дозирања истрошених уља из ваљаонице). Како је садржај укупног баласта у гориву у наведеном случају велики, потребна је подршка сагоревања пропан бутаном или неким другим висококалоричним горивом.

Приликом сагоревања нискоквалитетних фракција угља Лубница остварује се мања разлика температура у слоју и изнад слоја, али и већа емисија SO_x и NO_x него у случају сагоревања течних горива наведених у овом раду. Проблем емисије SO_x

гасова лако се решава додавањем кречњака у слој, односно амонијака или рециркулацијом димних гасова у случају повећане емисије NO_x .

Посматрање пламена кроз ревизиони отвор ложишта потврдило је постојање интензивног мешања у слоју приликом свих испитивања, како и добре испуњености пламена по запремини ложишта, што указује да је остварена оптимална кинетика процеса термичке разградње испитиваних горива.

Захвалност

Овај рад је реализован у оквиру пројекта „Унапређење индустријског постојења са флуидизованим слојем у оквиру развоја технологије за енергетски ефикасно и еколошки оправдано сагоревање различитих отпадних материја у флуидизованом ложишту”, Пројекат ТР33042 Министарства просвете и науке Републике Србије.

Ознаке

Ar	– Архимедов број, [–]
d_p	– пречник честице, [m]
H	– висина флуидизованог слоја, [m]
H_{mf}	– висина флуидизованог слоја за минималну брзину флуидизације, [m]
Re	– Рејнолдсов број за честице, [–]
ν_f	– кинематска вискозност флуида (гаса), [m^2s^{-1}]
ε	– порозност, [–]
ε_{mf}	– порозност слоја за режим минималне флуидизације, [–]
ρ_{mf}	– густина слоја за режим минималне флуидизације, [kgm^{-3}]
ρ_c	– густина флуидизованог слоја, [kgm^{-3}]

Литература

- [1] Nemoda, S., *et al.*, Numerical Model of Gaseous Fuel Jet Injection into a Fluidized Furnace, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52 (2009), 15-16, 3427-3438
- [2] Младеновић, М., и др., Експерименти сагоревања различитих течних горива у ложишту са флуидизованим слојем, *Зборник радова на комјакт диск*, 14. симпозијум термичара Србије „Енергија, екологија, ефикасност”, Сокобања, 13-16. октобар 2009, ИСБН 978-86-80587-96-7, 585-592
- [3] Младеновић М., и др., Експерименти сагоревања различитих течних горива у ложишту са флуидизованим слојем, *Термотехника*, 36 (2010), 1, 133–142
- [4] Младеновић, М., *et al.*, Fluidized Bed Combustion of Low Grade Fractions of Lubnica Coal, *Book of Abstract on CD, "Power Plants 2010"*, Vrnjačka Banja, Serbia, October 26-29, 2010, e2010.drustvo-termicara.com/papers/download/92.
- [5] Младеновић, М., *et al.*, Technology Application in Fluidized Bed Combustion of Coal's Low Grade Fractions and Off-Balance Reserves, *Book of Abstract, 3rd International Symposium "Energy Mining 2010"*, Banja Junaković, Apatin, Serbia, Septembar 8-11, 2010
- [6] ***, Уредба о граничним вредностима емисије загађујућих материја у ваздуху (Сл. гласник РС, број 71/2010), 4. октобар 2010.
- [7] Dakić, D., Oka S., Grubor B., Investigation of Incipient Fluidization and Expansion of a Course Particle Bed (in Russian), (Eds. S. S. Kutateladze, S. Oka) *Transport Processes in High-Temperature and Chemically Reacting Flows*, Siberian Branch of USSR Academy of Sciences, Novosibirsk, USSR, 1982, 76-90
- [8] Barker, D., Beacham, B., Development and Commercial Application of Liquid-Fuelled Fluidised Combustion, *Proceedings, Institute of Fuel Conference Fluidized Combustion: Systems and Applications*, London, UK, 1980, p.IA-3-1

- [9] Okasha, F. M., El-Emam, S. H., Mostafa, H. K., The Fluidized Bed Combustion of a Heavy Liquid Fuel, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 27 (2003), 4, 473-480
- [10] Miccio, F., *et al.*, Dispersion and Combustion of a Bitumen-Based Emulsion in Bubbling Fluidized Bed, *Proceedings on CD*, 15th International Conference on Fluidized Bed Combustion, (Ed. R. B. Reuther), ASME, FBC99-0141, 1999, 1354-1376
- [11] Anthony, E. J., Lu, D. Y., Zhang, J. Q., Combustion Characteristics of Heavy Liquid Fuels in a Bubbling Fluidized Bed, *Journal of Energy Resources Technology*, 124, (2002), 1, 40-47
- [12] North, B., Eleftheriades, C., Engelbrecht, A., Destruction of a High Sulphur Pitch in an Industrial Scale Fluidized Bed Combustor, *Proceedings on CD*, 15th International Conference on Fluidized Bed Combustion (Ed. R. B. Reuther), ASME, FBC99-0017, 1991
- [13] Miccio, F., Scala, F., Chirone, R., Fluidized Bed Combustion of a Biomass Fuel: Comparison between Pilot Scale Experiments and Model Simulations, *Journal of Heat Transfer*, 127 (2005), 2, 117-123
- [14] Patumsawad, S., Cliffe, K.R., Experimental Study on Fluidised Bed Combustion of High Moisture Municipal Solid Waste?, *Energy Conversion and Management*, 43 (2002), 17, 2329-2340
- [15] Lai, W. C., Krieger-Brockett, B., Volatiles Release Rates and Temperatures during Large Particle Refuse Derived Fuel-Municipal Solid Waste Devolatilization, *Combust Sci and Technol*, 85 (1992), 1-6, 133-149
- [17] Suksankraisorn, K., Patumsawad, S., Fungtammasan, B., Combustion Studies of Highmoisture Content Waste in a Fluidised Bed, *Waste Management*, 23 (2003), 5, 433-439

Abstract**Vertical Temperature Profile in the Fluidized Bed Installation for Combustion of Waste Fuels**

by

Milica R. MLADENOVIC^{1}, Milijana J. PAPRIKA¹, Dragoljub V. DAKIĆ²
Stevan Dj. NEMODA¹, Aleksandar M. ERIC¹, and Mirko S. KOMATINA³*¹ Laboratory for Thermal Engineering and Energy,
Vinča Institute of Nuclear Sciences, University of Belgrade, Belgrade, Serbia,² Innovation Center, Faculty of Mechanical
Engineering, University of Belgrade, Belgrade, Serbia³ Faculty of Mechanical Engineering, University of Belgrade, Belgrade, Serbia

This paper is a contribution to the investigation of combustion of waste liquid and solid fuels. Waste liquid fuels include sediment from crude-fuel oil tanks or used edible/mineral oils, the disposal of which is most often linked to environmental issues. In addition, these substances, due to high ballast content, non-uniform composition and density, cannot be burnt in conventional combustors, hence the technology of thermal disintegration in the fluidized bed (FB) imposes as a solution, which enables the combustion of fuels of most distinct types and non-uniform compositions. Waste solid fuels refer to coals from off-balance reserves (fine-grained, with high ballast and sulfur contents and low heating values) which should be used more rationally, implying the application of the FB combustion (FBC) as well. The fact that FB boilers can burn fuels with 85% of inert materials, with effective retention of SO₂ by adding limestone into the furnace, and with lower NO_x emissions, gives FBC significant advantages, compared to other combustion technologies.

Description of the experimental FBC facility is given, as well as experimental results, with the focus on the furnace temperature distribution, in order to determine the location of the intensive combustion zone as a function of fuel properties.

Key words: *waste liquid fuels, low-grade coal, fluidized bed*

* Corresponding author; e-mail: mica@vinca.rs

Рад примљен: 24. априла 2012.
Рад ревидиран: 28. маја 2012.
Рад прихваћен: 28. јуна 2012.