

Милица Р. Младеновић^{1*}, Сиван Ђ. Немода¹, Драгољуб В. Дакић¹,
Бранислав С. Рејић¹, Александар М. Ерић¹, Дејан М. Ђуровић¹,
Мирко С. Комајина²

¹ Лабораторија за термотехнику и енергетику,

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

² Машински факултет, Универзитет у Београду, Београд, Србија

Експерименти сагоревања различитих течних горива у ложишту са флуидизованим слојем

Оригинални научни рад

UDC: 662.753/.758-912

Овај рад представља допринос истраживању сагоревања алтернативних течних горива попут: шалога из резервоара сирове нафте, затим течних материја насталих као nusпроизвод у процесима процесне, пепрохемијске и металуршке индустрије, искоришћених јестивих и минералних уља, или глицерина nusпродукта производње биодизела. Ове материје се најчешће претварају као отпадне или испрошене материје и њихово одлагање/уклањање је најчешће скопично са великим еколошким проблемима. Поред тога, те материје се због великог садржаја баласта, неуједначеног састава и густине не могу сагоревати у уобичајеним уређајима за сагоревање течних горива, па се као решење намеће технологија термичке дезинтеграције у флуидизованом слоју, који омогућава сагоревање материја најразличитијег порекла и неуједначеног састава, уз смањење емисије полутања и велику термичку инерентност постројења.

У раду је даје експерименталне инсталације за сагоревање течних горива великих густина у флуидизованом слоју, као и приказ експерименталних резултата сагоревања неколико типова течних горива са и без нечистоћа, различитих густина и вискозитета, са и без додавања воде, у дужијим, стационарним режимима. Приликом анализе експерименталних акцената је представљен на ефикасности и стабилности сагоревања горива различитог састава. Разматран је садржај штећних продуката сагоревања, уз анализу распореда температуре у ложишту ради одређивања локације зоне инјензивног сагоревања у зависности од карактеристика горива.

Кључне речи: шешко течна гориво, флуидизовани слој, сирова нафта, искоришћена мазива-уља, течна отпадна горива

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

Увод

Отпадне материје представљају нуспроизвод сваког модерног индустријског друштва. Уопштено говорећи, то су материје које немају тржишну вредност и стога захтевају адекватно одлагање/уклањање. Предмет овог рада су управо такве течне материје попут талога у резервоарима сирове нафте и тешки продукти фракционе дестилације комерцијалних течних горива, затим искоришћене течне материје и емулзије у процесној, петрохемијској, металуршкој и прехрамбеној индустрији. Оне садрже велику количину тешких угљоводоника и смола тако да у нормалним атмосферским условима имају велику вискозност и густину или су у чврстом стању. Истовремено, топлотна моћ тих материја је махом већа или је на нивоу топлотне моћи домаћих угљева, па њихово сагоревање омогућава и постизање додатних енергетских, па самим тим и економских ефеката, па их стога називамо *тешким течним горивима* (ТТГ). ТТГ, поред наведених особина, карактерише и неуједначен састав, висок садржај воде и минералних материја као и већа заступљеност штетних материја по здравље људи [1-6] па се као оптимално решење, са тачке гледишта енергетске ефикасности и екологије, намеће сагоревање и разградња ТТГ до нешкодљивих облика, у флуидизованом слоју (ФС), који омогућава сагоревање материја најразличитијег порекла и веома неуједначеног састава, уз смањење емисије полутаната [5, 7].

Због ограничених резерви фосилних горива и утицаја на ефекат „стаклене баште“ савремени тренд у свету је, уз искоришћење отпадних материја у енергетске сврхе, коришћење и других алтернативних горива међу којима биодизел заузима значајно место. Главни нуспроизвод производње биодизела је глицерин (од полазне сировине за добијање биодизела, рецимо искоришћених јестивих уља, 10% масених отпада на глицерин). Све већа потражња за биодизелом може довести до презасићености тржишта глицерином па се и он може третирати као отпад и користити као гориво, стога је и овој врсти течног горива посвећена пажња у раду.

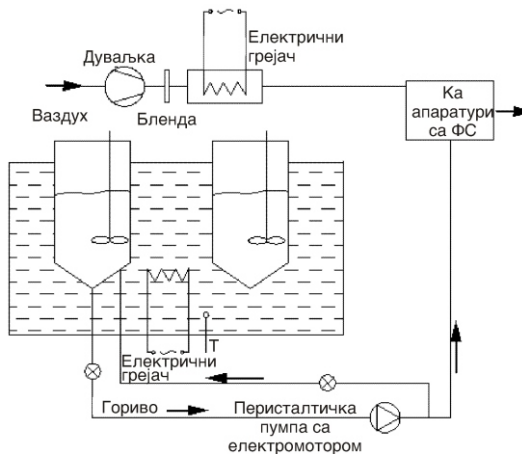
Испитивања сагоревања наведених „алтернативних“ течних горива (ТГ) обављена су на полуиндустријској експерименталној инсталацији са ФС и то: нафтног муља из резервоара сирове нафте Рафинерије нафте у Панчеву, употребљених масти/уља из ливница, и са две врсте модел-горива (јестиво уље и глицерин). Показано је да ТТГ (нафтни муљ и отпадна уља/масти из металуршког процеса) могу успешно да сагоревају у ФС уз смањену емисију полутаната, док је сагоревање друга два хомогена горива (уље и глицерин) у дуготрајним стационарним режимима изведено у циљу оптимизације процеса. Дат је опис апаратуре и експерименталног поступка, као и приказ експерименталних резултата. Због тешкоћа при дозирању, скопчаних са великим садржајем нечистоћа у гориву, с једне, и димензијама дозир-линије и карактеристикама пумпи, с друге стране, посебан акценат је дат унапређењу овог дела апаратуре.

Опис апаратуре

Експериментална апаратура за испитивање подобности сагоревања ТГ у ФС се састоји од:

система за дозирање течног горива,
система за сагоревање у флуидизованом слоју, и
система за анализу гаса и аквизицију температура.

Систем за дозирање чине два резервоара с ТТГ уроњена у води, грејаној електричним грејачем (сл. 1). У њима се меша гориво електричним мешалицама. Перисталтичка дозир пумпа (са регулисањем броја обртаја, фреквентним регулатором) потискује загрејано гориво из резервоара ка млазници и апаратури за сагоревање. Гориво, загрејано на 70–90 °С, се у ФС кроз млазницу уводи са стране, косо, дубоко у



Слика 1. Шема система за дозирање течног горива

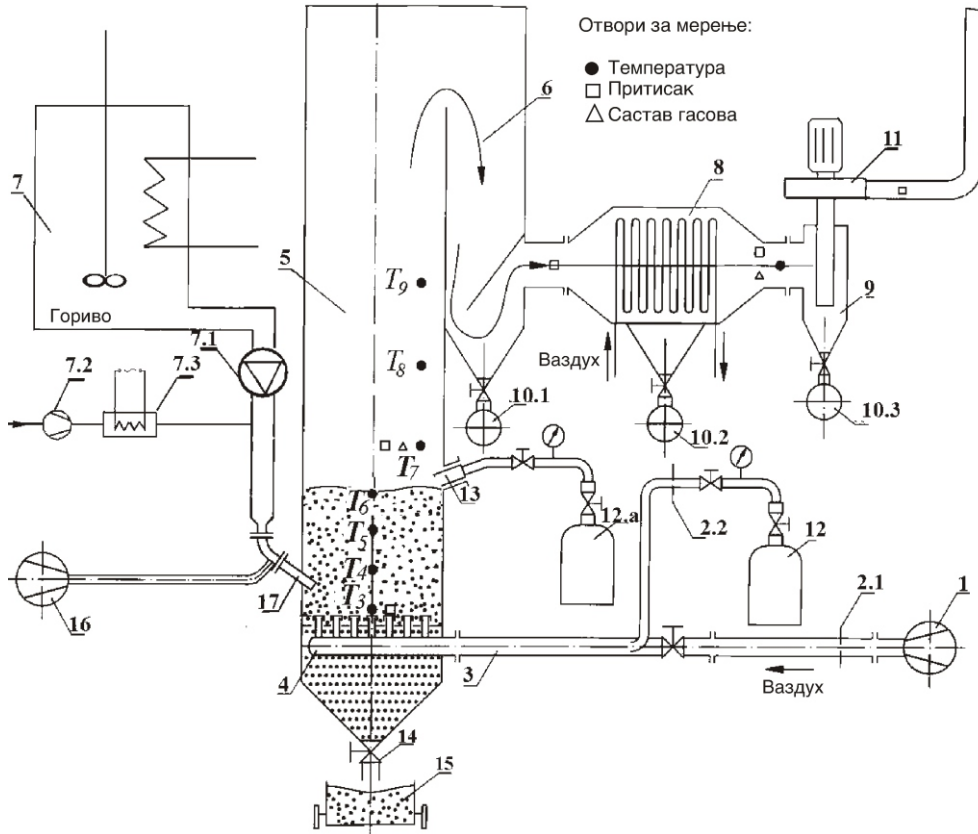
слој. Млазница за гориво се састоји од две коаксијалне цеви [8]. ТТГ се уводи кроз унутрашњу цев, кроз коју се истовремено уводи и централни ваздух (температуре око 80 °С), који потпомаже транспорт горива кроз млазницу, као и његово распршивање уз истовремено хлађење млазнице. Вод за носећи/централни ваздух се састоји од дувалке за ваздух и грејача снаге 0,5 kW (сл. 1). Додатно хлађење млазнице постиже се ануларним увођењем ваздуха из околине, кроз другу коаксијалну цев.

Гориво се у експериментално постројење уводи системом за дозирање горива (7) кроз цев-млазницу (17) у ФС (сл. 2). Ваздух се у ФС доводи кроз дистрибутор (4). Димни гасови са честицама догоревају у простору ложишта изнад слоја. Материјал слоја чини кварцни песак средњег пречника 0,8 mm: насипне густине 1585 kg/m³, висина слоја је 370 mm (*гориво-I*), насипне густине 1475 kg/m³, висина слоја је 330 mm (*гориво-II*). Најгрубље честице пепела које се нису задржале у слоју се из струје димних гасова издвајају непосредно након излаза из ложишта (10.1). Димни гасови затим пролазе кроз ваздушни хладњак (8), испод кога се такође издвајају честице у посуду (10.2). Најфиније честице се уклањају из струје димних гасова у циклону (9). Димни гасови из којих су уклоњене честице се транспортују вентилатором у атмосферу. Праћење и записивање измереног састава гаса и температуре се обавља помоћу посебног софтвера развијеног у Лабораторији за термотехнику и енергетику Института за нуклеарне науке „Винча“.

Резултати испитивања подобности сагоревања горива у ФС

У раду су дати резултати експеримента изведених са четири типа горива:

- истрошених уља и масти из хладне ваљалонице (*гориво I*),
- нафтни муљ из резервоара сирове нафте Рафинерије нафте у Панчеву (*гориво II*),



Слика 2. Шема лабораторијског експерименталног ФС ложишта са дозирањем у слој

(1) – дувалка за примарни ваздух, (2.1, 2.2) – мерне бленде, (3) – електрични грејач, (4) – ваздушна комора са дисјерибутором ваздуха, (5) – ложиште са ФС (I промаја), (6) – механички шаложник честица (II промаја), (7) – систем за дозирање горива, (7.1) – дозирна пумпа, (7.2) – дувалка за носећи ваздух, (7.3) – грејач за носећи ваздух, (8) – хладњак димних гасова, (9) – циклонски одијрашивач, (10.1–10.3) – судови за шалужење честица, (11) – вентил, (12, 12.a) – боце са пропан-бутином, (13) – жорионик за подијалу, (14) – славина за испуштање материјала из ложишта, (15) – посуда за прикупљање материјала из ложишта, (16) – дувалка за ваздух за хлађење млазнице, (17) – млазница

- јестиво уље (гориво III), и
- глицерин (гориво IV).

Резултати испитивања сагоревања горива I [9]

Гориво I: истрошено уље из хладне ваљанице помешано са водом у односу 50:50%; проток горива 6,5 7 l/h; мешавина уље/вода је хомогенизована мешањем

електричном мешалицом и загрејана до 70 °С; измерени коефицијент вишка ваздуха 2,3 (сл. 3).

Снимљено поље температура указује на потпуно и стабилно сагоревање. Појава ниже температуре у зони изнад слоја (Т8) од оних у слоју и „*splash*” зони (Т7), указује да је зона интензивног сагоревања лоцирана ближе слоју, што је услов стабилног и потпуног сагоревања у датом систему.

Остварена је, такође, ниска емисија штетних гасова у продуктима сагоревања са усредњеним вредностима (у односу на референтну вредност кисеоника од 3, 7 и 11%) наведеним у табл. 2. Садржај CO је у свим случајевима знатно нижи од стандардом дозвољених референтних вредности, као и NO, изузев за сведене мерене вредности на 3% O₂. Средње вредности концентрација NO одговарају средњим вредностима λ, па у реалним условима за мање λ, и концентрација NO ће бити мања.

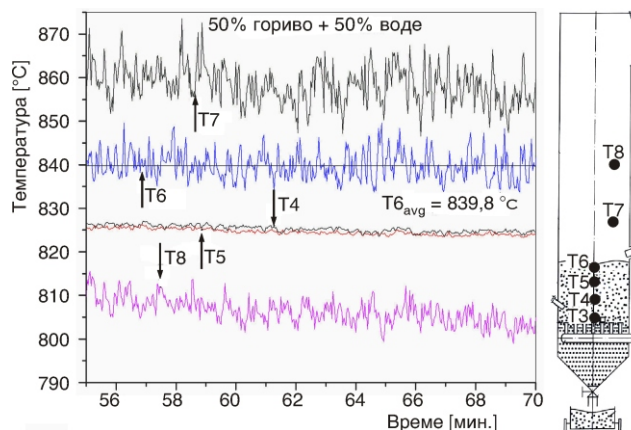
Резултати сагоревања горива II [9]

Гориво II: муљ из резервоара сирове нафте је помешан са водом у односу 40:60%; проток горива: 10–17 l/h; мешавина муљ/вода је хомогенизована мешањем електричном мешалицом и загрејана до 85 °С. Измерени коефицијент вишка ваздуха 2,7.

Таблица 1. Параметри* сагоревања горива I у експериментима у ложишту са ФС

| Режим | λ | L ₀ | t _s | Запремински састав сувих продуката сагоревања | | Масени проток горива | Масени проток ваздуха | Масени проток сагоревања | Густина протока сагоревања | Топлотна моћ горива |
|-------|------|----------------|----------------|---|----------------|----------------------|-----------------------|--------------------------|----------------------------|---------------------|
| | | | | CO ₂ | O ₂ | | | | | |
| | | | | % | | | | | | |
| I | 2,70 | 11,82 | 842 | 5,54 | 13,54 | 6,33 | 82,11 | 88,27 | 0,30 | 14052 |

* λ – коефицијент вишка ваздуха, L₀ – теоријска количина ваздуха потребна за потпуно сагоревање јединичне масе горива, t_s – теоријска температура сагоревања



Слика 3. Измерене температуре у ложишту са ФС за гориво I

Таблица 2. Средњи садржај штетних гасова у продуктима сагоревања истрошеног уља у ложишту са ФС

| Референтне вредности O ₂ [%] ¹ | Режим | Измерене вредности [mgm ³] | | | Референтне вредности ² [mgm ³] | |
|--|-------|--|------|----------------------------------|---|----------------------------------|
| | | CO | NO | NO (сведено на NO ₂) | CO | NO (сведено на NO ₂) |
| 3 | I | 0 | <240 | <492 | 250 | 450 |
| 7 | | ≈0 | <187 | <382 | | 1000 |
| 11 | | ≈0 | <133 | <273 | | 500 |

¹ Референтна вредност O₂ за ложишта са сагоревањем: (1) у флуидизованом слоју 7%, (2) биомасе 11% и (3) течних и гасовитих горива 3%

² Правилник о граничним вредностима емисије, начину и роковима мерења и евиденцирања података, Министарство заштите животне средине, Република Србија

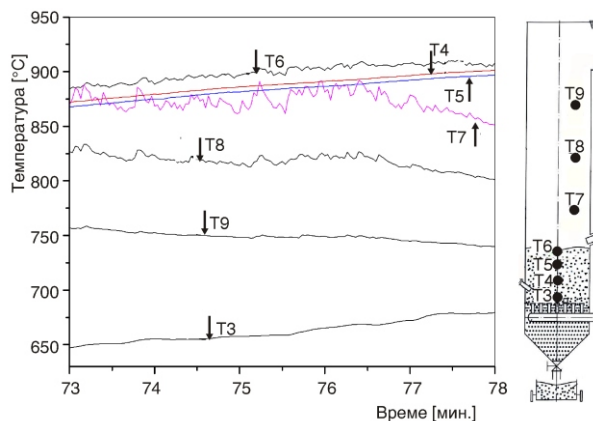
Сагоревањем горива II добијено је стабилно сагоревање, уз средњу температуру у слоју око 900 °C. Постигнута је повољна емисија гасова продуката сагоревања, са веома ниским садржајем CO. Температура на горњој ивици слоја била је блиска температури непосредно изнад њега, што указује да је мешање у слоју било оптимално уз интензивно сагоревање у самом слоју, што је потврђено визуелним посматрањем пламена.

Узорак горива II био је са 45,77 мас.% воде и 23,37 мас.% пепела, али због потешкоћа са дозирањем додато је још 60% воде на укупну масу горива, па су ефективни масени удели воде и пепела у гориву које је дозирано у ложиште, били: 78,31% и 9,35%, респективно (случај I, табл. 3). Овакво гориво је врло тешко сагоревати, чак

Таблица 3. Параметри прорачуна и експеримената са сагоревањем муља из резервоара сирове нафте у пилот-ложишту са ФС

| Случај | | s _r | Запремински састав сувих продуката сагоревања | | | | | Масени проток горива | Масени проток ваздуха | Масени проток продуката сагоревања | Топлотна моћ горива | Снага ложишта |
|--------------|-----|----------------|---|----------------|-----------------|-------|------------------|----------------------|-----------------------|------------------------------------|---------------------|---------------|
| | | | CO ₂ | O ₂ | SO ₂ | CO | N ₂ O | | | | | |
| | | | % | | | | | | | | | |
| I прорачун | 2,5 | 668 | 6,06 | 12,91 | 0,05 | | 81 | 13,7 | 58,38 | 70,79 | 3117,5 | 13,40 |
| II мерење | 2,7 | 906 | 5,31 | 13,57 | 0,04 | <0,01 | 81,1 | 13,7 муљ + 2,61 гас | 154,4 | 169,3 | 9981 | 45 |
| III прорачун | 2,6 | 888 | 5,82 | 13,23 | 0,05 | | 80,9 | 13,7 | 151,8 | 162,3 | 11263 | 42,86 |

и у ФС, без подршке додатног висококалоричног горива, као што се може видети из прорачунатих података, табл. 3, под I. Због тога је у ложиште додат ток од 2,608 kg/h смеше пропана и бутана као подршка сагоревању 13,7 kg/h датог горива са високим садржајем воде (случај II, табл. 3). Ова смеша тешког течност горива и гаса је стабилно сагоревала, а у стационарним условима су забележене усредњене вредности приказане под II у табл. 3. Као што се из дате таблице види, смеша нафтног муља и гаса, са ефективним садржајем воде од 67,51 мас. % воде и 8,06 мас. % пепела стабилно сагоревала на температурама изнад 900 °C, уз веома ниску концентрацију CO у продуктима сагоревања. Да је дозирање у ФС без додатне количине воде успело, тада би ово гориво такође стабилно сагоревало, као што то и показују рачунски подаци (табл. 3, под III) (сл. 4).



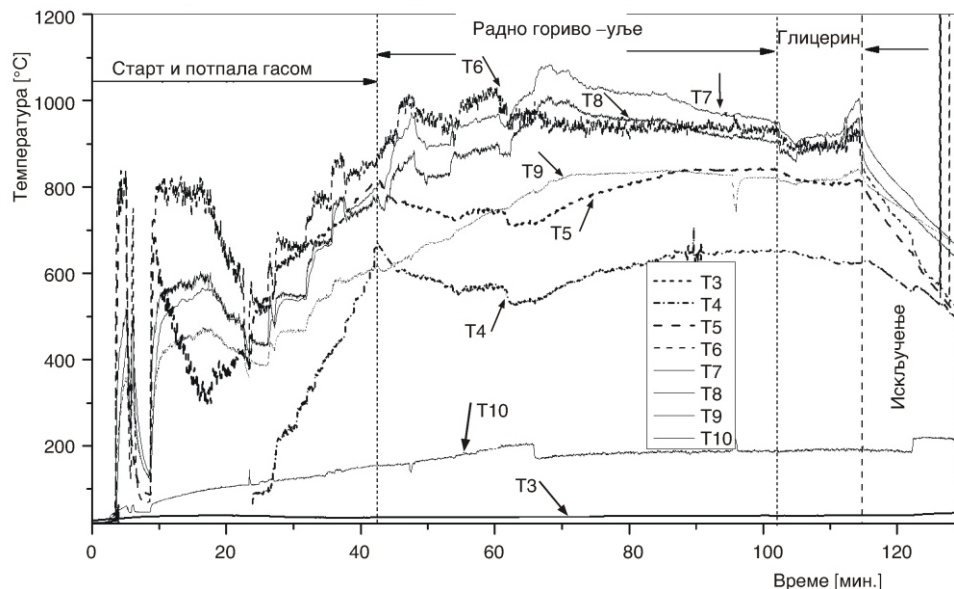
Слика 4. Измерене температуре у ложишту са флуидизованим слојем за гориво II

Резултати испитивања сагоревања горива III и IV

Претходним експериментима је показано да горива са високим садржајем баласта, механичких нечистоћа и неуједначеног састава могу успешно сагоревати у

Таблица 4. Параметри прорачуна и експеримента са сагоревањем горива III и IV у пилот-ложишту са ФС

| Случај | | s_f | Запремински састав сувих продуката сагоревања | | | | | Масени проток горива | Масени проток ваздуха | Масени проток продуката сагоревања | Топлотна моћ горива | Снага ложишта |
|--------------|------|-------|---|----------------|-----------------|----|------------------|----------------------|-----------------------|------------------------------------|---------------------|---------------|
| | | | CO ₂ | O ₂ | SO ₂ | CO | N ₂ O | | | | | |
| | | | % | | | | | | | | | |
| III прорачун | 2,79 | 950,5 | 5,52 | 13,76 | 0 | 0 | 80,71 | 4,12 | 142,16 | 146,29 | 37041 | 42,4 |
| IV прорачун | 2,98 | 910,3 | 6,11 | 14,08 | 0 | 0 | 79,81 | 7,92 | 123,13 | 131,05 | 16579 | 36,5 |



Слика 5. Експеримент са III и IV радним горивом приказан у целисти од потпале ФС до гашења

ФС. У циљу даље оптимизације процеса сагоревања, у датим системима, као и анализе утицаја хемијског састава и физичких карактеристика различитих горива, извршени су експерименти сагоревања са хомогеним горивима тзв. модел-горивима уљем и глицерином. Ова два горива имају вискозност која дозвољава да се дозирају у ФС без претходног загревања.

Из дијаграма (сл. 5) може се уочити увлачење зоне сагоревања у слој приликом прелаза са уља (гориво III) на глицерин (гориво IV) и сужавање температурског интервала између температура у слоју и непосредно изнад њега (Т5, Т6 и Т7). Стога следи да глицерин има знатно боље физичко-хемијске карактеристике за сагоревање у ложишту са ФС од уља, иако има нижу топлотну моћ од уља (види табл. 4), јер лакше испарава и боље се меша са честицама загрејаног инертног материјала ФС. Параметри сагоревања горива III и IV у пилот-ложишту са ФС су дати у табл. 4.

Закључак

На основу изведених експеримената сагоревања две врсте ТТГ (муљ из резервоара сирове нафте Рафинерије нафте у Панчеву и употребљена маст из ливница) и две врсте модел-горива (јестивог уља и глицерина), у дуготрајним стационарним режимима може се закључити следеће:

потпуно и стабилно сагоревање ТТГ у дуготрајним стационарним режимима је остварено применом предложеног ложишта са ФС;

остварено је ефикасно сагоревање мешавине горива и воде, при чему су параметри сагоревања повољнији приликом коришћења мешавине горива и воде са становишта емисије СО (табл. 3); зона интензивног сагоревања је лоцирана унутар или непосредно изнад флуидизованог слоја уз интензиван пренос топлоте и масе; остварена је ниска емисија штетних гасова у продуктима сагоревања, за СО далеко мања од дозвољене, а за NO мања или близу граничних вредности (табл. 2); предложено решење је вишеструко корисно јер не само да решава проблем одлагања нафтног муља и истрошених уља и масти на еколошко прихватљив начин, већ истовремено омогућава искоришћење у енергетске сврхе као гориво са израженим енергетским потенцијалом; сагоревањем хомогених тзв. модел-горива јестивог уља и глицерина показан је утицај горива различитих физичко-хемијских карактеристика на температурно поље у ложишту са ФС што ће послужити за даљу оптимизацију процеса сагоревања течних горива различитих карактеристика у овом експерименталном пилот-постројењу.

Литература

- [1] Werther, J., Ogada, T., Sewage Sludge Combustion, *Progress in Energy and Combustion Science*, 25 (1999), 1, 55-116
- [2] Ока, С., Грубор, Б., Стање развоја котлова са сагоревањем у циркулационом флуидизованом слоју, Интерни извештај ИБК-ИТЕ-645, Београд, Винча, 1987.
- [3] Miccio, F., Okasha, F. M., Fluidized Bed Combustion and Desulfurization of a Heavy Liquid Fuel, *Chemical Engineering Journal*, 105 (2005), 3, 81-89
- [4] Пић, М., Contratto di consulenza professionale stipulato con il Dipartimento di Ingegneria Chimica ed Alimentare dell'Università degli Studi di Salerno, September 14, 2001, Italija
- [5] Okasha, F. M., El-Emam, S. H., Mostafa, H. K., Fluidized Bed Combustion of a Heavy Liquid Fuel, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 27 (2003), 4, 473-480
- [6] Yan, R., Tee Liang, D., Tsen, L., Case Studies – Problem Solving in Fluidized Bed Waste Fuel Incineration, *Energy Conversion and Management*, 46 (2005), 7-8, 1165-1178
- [7] Младеновић, М., Немода, С., Белошевић, С., Дакић, Д., Младеновић, Р., Ерић, А., Паприка, М., Репић, Б., Карактеризација узорака тешког нафтног горива (ТНГ), НИВ-ИТЕ 312, Институт за нуклеарне науке „Винча”, 2006, Београд
- [8] Младеновић, М., Немода, С., Белошевић, С., Дакић, Д., Младеновић, Р., Ерић, А., Паприка, М., Репић, Б., Конструкција млазнице за убризгавање тешког нафтног горива (ТНГ) у флуидизован слој, концепција постројења за сагоревање ТНГ-а и реконструкција постојеће експерименталне инсталације са ФС, Институт за нуклеарне науке „Винча”, 2006, Београд
- [9] Младеновић, М., Немода, С., Белошевић, С., Дакић, Д., Младеновић, Р., Ерић, А., Репић, Б., Резултати испитивања сагоревања тешког течног горива на полуиндустријској експерименталној инсталацији са флуидизованим слојем у дуготрајним стационарним режимима рада, НИВ-ИТЕ 383, Институт за нуклеарне науке „Винча”, 2008, Београд

Abstract

**The Experiments of Fluidized Bed
Combustion of Diversely Liquid Fuel**

by

Milica R. MLADENOVIĆ^{1}, Stevan Dj. NEMODA¹, Dragoljub V. DAKIĆ¹,
Branislav S. REPIĆ¹, Aleksandar M. ERIĆ¹, Dejan M. DJUROVIĆ¹, and
Mirko S. KOMATINA²*

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**

This paper is a contribution to the investigation of combustion of alternative liquid fuels, such as: the sediment from crude-fuel oil tanks; liquid substances – by-products of processes in process, petrochemical and metallurgical industries; used edible and mineral oils; or glycerine – by-product of biodiesel production. These substances are most commonly treated as waste or used matter, and their disposal/removal is most often linked to considerable environmental problems. In addition to this, these substances, due to high content of balast matter, non-uniform composition and density, can not be burnt in conventional liquid fuel combustors, hence the technology of thermal disintegration in the fluidized bed imposes as a solution, which enables the combustion of fuels of most distinct types and non-uniform compositions, together with diminishing pollutant emissions and high thermal inertia of the facility.

In the paper, a description of the experimental set-up for the combustion of high density liquid fuels in the fluidized bed is given, as well as experimental results obtained by combustion of several liquid fuel types, with or without impurities, with different densities and viscosities, with or without adding water, in long-term, steady regimes. During the analysis of the experiments, the focus was set on the combustion efficiency and stability, for fuels of various compositions. The content of harmful combustion products has been considered, as well as the analysis of furnace temperature distribution, in order to determine the location of the intensive combustion zone as a function of fuel properties.

Key words: *heavy liquid fuel, fluidized bed, crude fuel oil, used lubricating oil, waste liquid*

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

Рад примљен: 20. фебруара 2010.

Рад прихваћен: 8. марта 2010.